INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

NUEVA ASTROFISICA SOLAR

FLUJO DE GENES ENTRE ESPECIES

ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS RADIACTIVOS

ARQUITECTURA DE LA VIDA



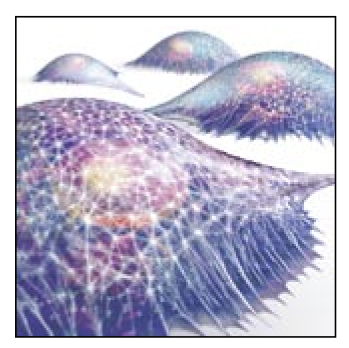
MARZO 1998
800 PTAS.



Marzo de 1998 Número 258

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4-5	Portrait © Atelier Lotte Meitner-Graf, fotografías cortesía del Archivo sobre Historia de la Sociedad Max Planck, Berlín
6	Cortesía del Museo Alemán, Munich (*arriba*); J. W. Van Spronsen, Elsevier, Amsterdam, 1969 (*abajo, izquierda*), Cortesía del Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley, Univ. de California (*derecha*)
7	Jared Schneidman Design
8	Cortesía del Archivo sobre Historia de la Sociedad Max-Planck, Berlín (*arriba*), AIP Emilio Segrè Visual Archives
9	Cortesía de Irmgard Strassmann
12	Sally Bensusen
13	Oliver Meckes
14-15	Dr. L. Caro (*micrografía*); Sally Bensusen
16	Jennifer C. Christiansen
20-21	George Retseck
22	Bryan Christie, Mark Cowan
24	Daniel Hulshizer (*arriba*), William F. Haxby (*abajo*)
26-27	Laurie Grace
44-45	Kenneth Snelson (*primer plano*), Kate Nobes y Alan Hall (*fondo*)
46	Allegra Fuller Snyder (*arriba*), Albert K. Harris, Patricia Wild y David Stopak (*abajo*)
47	Slim Films; fuente: Donald E. Ingber (*arriba*); Ryota Matsuura, Robert Ezzell y Donald E. Ingber (*recuadro*); Laurie Grace (*dibujos*); Donald E. Ingber (*abajo, izquierda y centro*) y Robert D. Goldman (*derecha*)
48	Petit Format/Science Source (*arriba, izquierda*); Laurie Grace (*derecha*); Stefanie Kaech, Beat Ludin y Andrew Matus (*abajo*)
49	Donald E. Ingber (*arriba*), Slim Films; fuente: Donald E. Ingber
50-51	Kate Nobes y Alan Hall, Francis Leroy, Chris Heric, Ken Eward, M. Abbey y David Scharf
52	Jim y Julie Bruton (*arriba*), Kenneth Snelson (*abajo, izquierda*), Clarence E. Schutt (*derecha*)
53	Kenneth Snelson (*arriba*), Jennifer R. McCabe (*fondo*)
56-61	Slim Films
62-70	Guillermo W. Rougier, Marcelo S. de la Fuente y Andrea B. Arcucci
72	David Scharf
73	Laurie Grace
74-75	Laurie Grace (*arriba*); cortesía de Humphrey Maris (*a*), Tom Way (*c*), Laurie Grace (*gráficas*)
82	Michael Goodman
84	Michael Dalton
85	Michael Goodman
86	Michael Dalton
88	Dusan Petricic
96	Boris Starosta

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Xavier Roqué Rodríguez: *Lise Meitner y el descubrimiento de la fisión nuclear*; Santiago Torres: *Intercambio de genes bacterianos en la naturaleza*; Jesús Casado de Amezúa: *Almacenamiento de residuos en el subsuelo oceánico*; Esteban Santiago: *Geometría biológica*; Mónica Murphy: *La misión Ulises*; Juan Pedro Campos: *Ultrasonidos de picosegundos*; J. Vilardell: *Leonardo y la invención de la llave de rueda*, *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; José Mª Valderas Martínez: *Nexos*; Angel Garcimartín: *Perfiles*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs; Alden M. Hayashi; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider y Glenn Zorpette
Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.000	20.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

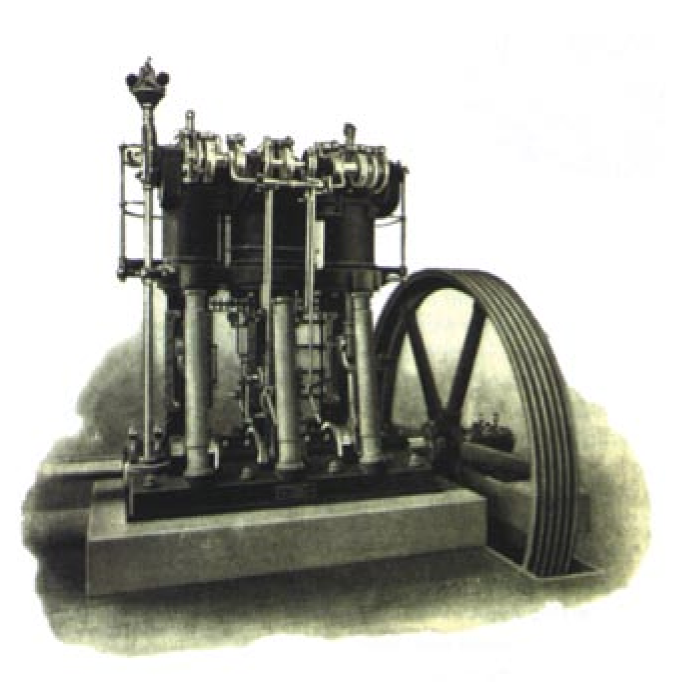
ADELANTOS EN RADIODIFUSIÓN. «Aunque la radio de la posguerra no ha llegado a ser todo lo que se proclamó, la FM y la televisión son dos avances importantes que se divisan en el horizonte. La televisión se encuentra todavía en sus primeras etapas de desarrollo. Además, al ser tan cara está reservada a los más privilegiados. Sin embargo, la FM ya está ocupando el puesto que merece. Cierto comerciante mayorista anuncia la venta de receptores portátiles de AM-FM por 59,45 dólares [unas 60.000 pesetas de 1998], lo que rebaja el precio de este tipo de radio a unos niveles al alcance de las economías medias.»

...cien años

ACERO Y PROGRESO. «Sir Henry Bessemer, inventor y metalúrgico, murió en Londres el 14 de marzo. La muerte de este gran hombre nos trae a la mente la importancia, por su precio y su gran calidad, que para el mundo tiene el acero Bessemer, que en su día revolucionó la industria pesada. En octubre de 1855 patentó su idea de hacer maleable al hierro fundido introduciendo aire atmosférico en el metal líquido para eliminar carbono. En el número de *Scientific American* de julio de 1896 los lectores dejaron constancia inequívoca de que consideraban el proceso Bessemer como el principal invento de los últimos cincuenta años.»

BOSQUE PETRIFICADO. «El comisario agrario Hermann recomienda que el bosque petrificado de Apache County (Arizona) pase a ser reserva forestal. Informes recibidos en el Departamento del Interior indican que el bosque se está explotando con fines comerciales y, a menos que el gobierno tome medidas que detengan el expolio, desaparecerá esa joya de la naturaleza, una de las curiosidades más famosas del mundo. En Denver se está construyendo un hotel, cuyos muros se van a revestir con madera silificada extraída del bosque, material que también se empleará para hacer las mesas.» [*Nota de la Redacción: En 1906 el Parque fue declarado monumento nacional.*]

EL MOTOR DE DIESEL. «Nada menos que un motor de combustión interna ha conseguido Rudolph Diesel, de Munich. Los experimentos que desembocaron en la construcción de la máquina actual *(abajo)* se iniciaron en 1882. En el motor de gasolina, o motor ordinario de combustión interna, la carga dentro de cada cilindro es encendida por un chorro, un tubo caliente o una chispa eléctrica. En el motor de Diesel la temperatura de encendido se consigue comprimiendo aire sin mezcla. Bajo una presión superior a las cuarenta atmósferas, el combustible (queroseno) se introduce gradualmente en el cilindro y se quema sin cesar durante la carrera del pistón.»



El nuevo motor de 150 caballos de Rudolph Diesel

...ciento cincuenta años

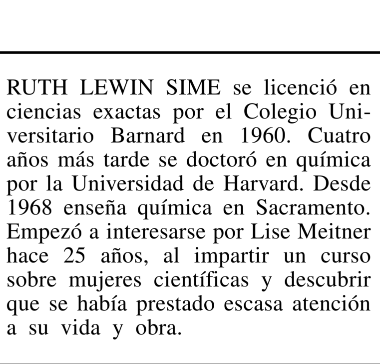
EN PRO DE LA OCEANOGRAFÍA. «El teniente Matthew F. Maury, superintendente del Observatorio Nacional, acaba de publicar una serie de cartas marinas donde se reseñan la fuerza y la dirección de los vientos y corrientes del Atlántico Norte. Esas cartas van acompañadas de un esbozo de diario de navegación en el que los capitanes de los mercantes pueden ir anotando la derrota diaria, las corrientes, observaciones termométricas, etc. Las cartas se entregan a los capitanes mercantes que se comprometen a llevar el diario y remitirlo a Washington a su retorno. Con ello se pretende recabar la máxima información que sirva de guía sobre los rumbos mejores en determinadas temporadas.»

PARARRAYOS. «Para proteger a los barcos de la caída de los rayos se han venido empleando cadenas conductoras de cobre y hierro. Pero acaba de aparecer un dispositivo mejor. Consiste en trozos de barras de cobre, de un metro veinte, remachadas entre sí formando un conductor. Ese montaje se incrusta en la parte posterior del palo mayor y se sujeta con clavos de cobre. En el casco, la barra conductora se une a la sobrequilla. Una fragata fue equipada con ese artefacto y en el extremo del mastelerillo del juanete mayor se aplicó una potente descarga eléctrica. El fluido eléctrico recorrió el conductor y salió al exterior del navío sin causar daños.»

TENSIÓN ELÉCTRICA. «Una comunicación a la Academia de Ciencias de París, remitida por Monsieur Pallas, sugiere que la excesiva influencia de la electricidad atmosférica o terrestre es la responsable de la mayoría de las neuropatías. Afirma que dotando de pies de vidrio a los armazones de las camas y aislándolos unos cincuenta centímetros de la pared, ha curado a los pacientes que dormían en esos lechos de un buen número de afecciones nerviosas.»

Lise Meitner y el descubrimiento de la fisión nuclear

Ruth Lewin Sime



RUTH LEWIN SIME se licenció en ciencias exactas por el Colegio Universitario Barnard en 1960. Cuatro años más tarde se doctoró en química por la Universidad de Harvard. Desde 1968 enseña química en Sacramento. Empezó a interesarse por Lise Meitner hace 25 años, al impartir un curso sobre mujeres científicas y descubrir que se había prestado escasa atención a su vida y obra.

Codescubridora de la fisión nuclear en 1938, la participación de Meitner fue ignorada por el jurado de los Nobel. La persecución racial, el miedo y el oportunismo se conjugaron para silenciar sus aportaciones

El descubrimiento, a finales de 1938, de que un neutrón podía partir en dos el núcleo de un átomo, representó para los físicos una auténtica sorpresa. Ninguna teoría física había predicho la fisión nuclear, ni sus descubridores podían imaginar que terminaría por aplicarse a la bomba atómica y las centrales nucleares. Esta parte de la historia es incuestionable.

Más controvertido es a quién reconocerle ese avance decisivo. El descubrimiento de la fisión nuclear fue el resultado de cuatro años de investigación por la física Lise Meitner y los químicos Otto Hahn y Fritz Strassmann, en su laboratorio de Berlín. En 1938, Meitner, de ascendencia judía, huía de la Alemania nazi, con la policía en los talones. Poco después, Hahn y Strassmann anunciaban el descubrimiento. Apenas transcurridas escasas semanas, Meitner y Otto R. Frisch, físico y sobrino suyo, hicieron pública la explicación teórica correcta de la fisión. Pero el premio Nobel de química de 1944 se le concedió a Hahn en solitario.

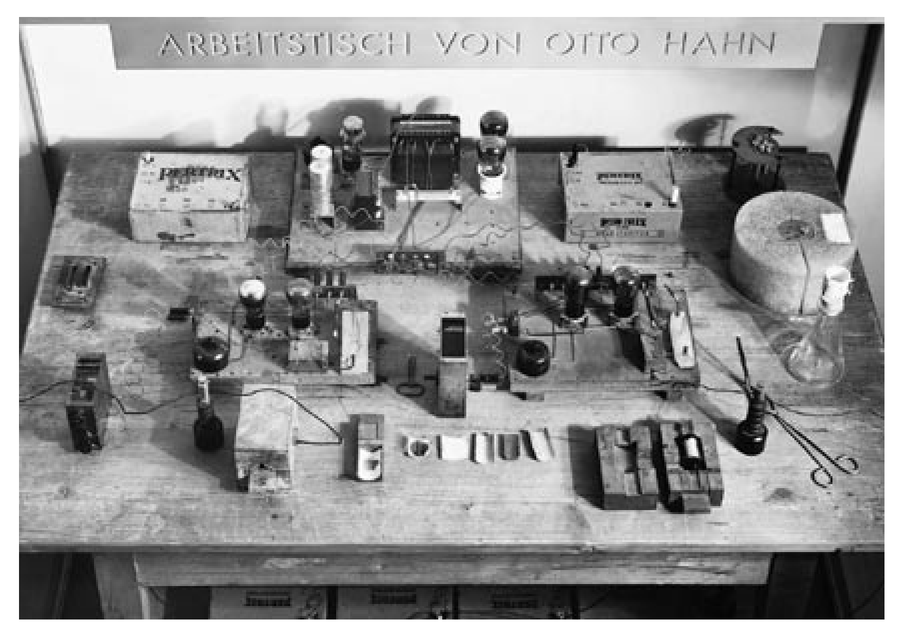
Que Strassmann no compartiera el galardón obedeció, probablemente, a su juventud; era el benjamín del grupo, y el jurado de los Nobel tiende a favorecer a investigadores avezados. Hahn y Meitner, sin embargo, tenían el mismo estatuto profesional. ¿Por qué se la excluyó? La respuesta dada por Hahn a esa pregunta persistió incontrovertida durante años. Según expuso, el descubrimiento se basó exclusivamente en experimentos químicos realizados tras la partida de Meitner de Berlín. Su éxito nada tenía que ver con Meitner ni con la física, que, si acaso, lo habían demorado.

Strassmann, a la sombra de Hahn, discrepaba. Meitner había sido para él la líder intelectual del equipo, incluso en su forzada ausencia, a través de la correspondencia mantenida con Hahn. Los documentos que nos han llegado apoyan la versión de Strassmann. Los artículos científicos muestran que la investigación que llevó al descubrimiento de la fisión fue verdaderamente interdisciplinar: el trabajo lo motivó un problema de física nuclear, pero el progreso de la investigación se vio favorecido e impedido por datos e hipótesis tanto de la física como de la química. Por su lado, la correspondencia entre los científicos implicados muestra que Meitner hizo contribuciones decisivas hasta el final mismo de la investigación.

De haberse guiado por el criterio normal de evaluación científica, el jurado de los Nobel tendría que haber reconocido la aportación de Meitner. Pero las condiciones en Alemania no podían estar más lejos de lo normal. Las leyes antisemitas forzaron su huida, apartándola de su laboratorio e impidiéndole firmar, junto a Hahn y Strassmann, el artículo en que se anunciaba la fisión. La opresión política y el miedo hicieron que, tras el descubrimiento, Hahn abriera una zanja entre su laboratorio y la fisión, a un lado, y Meitner y la física al otro. El Nobel no haría más que poner la rúbrica a tamaña injusticia. Según documentos a los que se ha levantado su condición de secretos, el comité Nobel no se dio cuenta de hasta qué punto el descubrimiento de



1. LISE MEITNER (a la izquierda en una imagen de 1930, cuando tenía cincuenta años) fue uno de los físicos nucleares más prestigiosos de su época. Pese a que fumaba y a que trabajó en radiactividad durante toda su vida, Meitner llegó a los noventa años. Otto Hahn y Meitner (*a la derecha*), fotografiados en su laboratorio de la Universidad de Berlín hacia 1910, fueron colegas y buenos amigos desde 1907 hasta que Meitner se vio obligada a huir de Alemania en 1938.



2. LOS INSTRUMENTOS DE FISICA de Meitner fueron utilizados por el equipo de Berlín entre 1934 y 1938 en los experimentos que llevaron al descubrimiento de la fisión. Desde los años cincuenta, este material se exhibió en el Museo Alemán de Munich con el rótulo “mesa de trabajo de Otto Hahn” (*línea superior*); se añadía una breve referencia a Fritz Strassmann, pero no se mencionaba a Meitner.

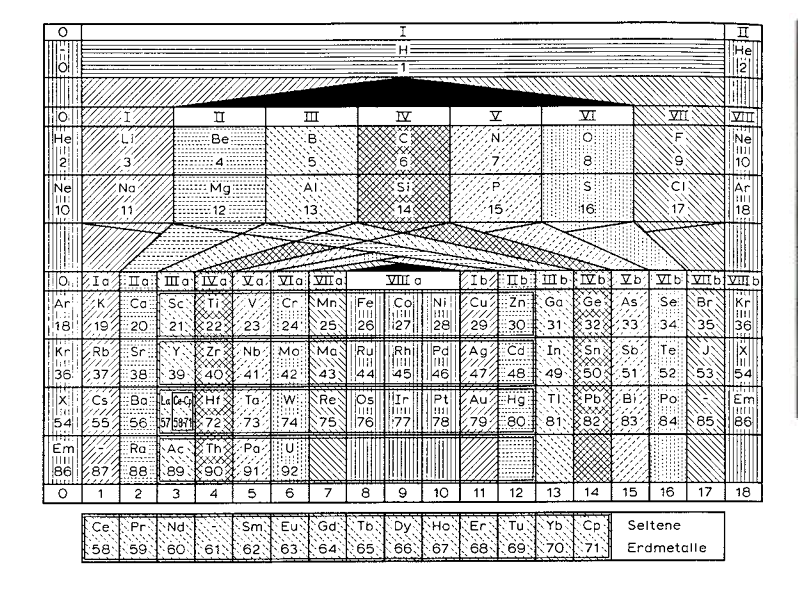
la fisión dependía de la física tanto como de la química; tampoco advirtió que Hahn no se había distanciado de Meitner por motivos científicos, sino por miedo, opresión política y oportunismo.

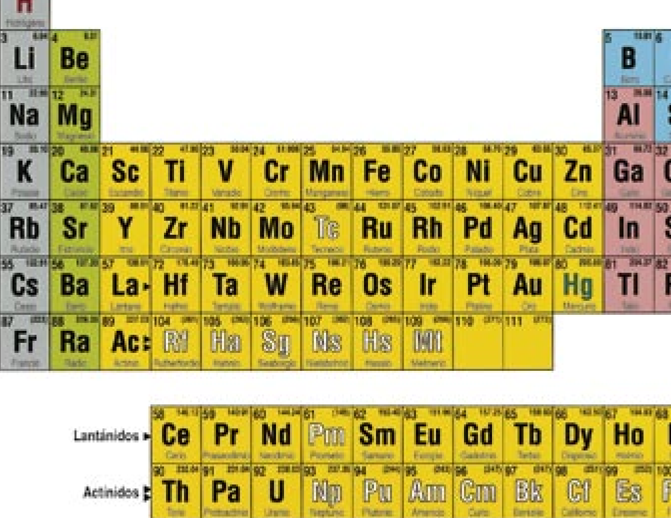
También contribuyeron a la marginación de Meitner su condición de refugiada en Suecia, la negativa a airear en la Alemania de la posguerra los crímenes del nazismo y el sentimiento generalizado —mucho más intenso entonces que ahora— de que las mujeres consagradas a la ciencia carecían de fuste y ocupaban un rango subordinado, si no desbarraban. Aunque Meitner apenas se pronunció en público sobre la cuestión, en privado describió el comportamiento de Hahn como una “pura supresión del pasado”, un pasado en el que ellos habían sido amigos y estrechos colegas. Debió pensar que la historia acabaría por poner a cada uno en su sitio. Así ha ocurrido, cincuenta años después.

Nacida y educada en Viena, Lise Meitner se trasladó a Berlín en 1907, a los veintiocho años. Allí se asoció a Otto Hahn, un químico de su edad, en el estudio de la radiactividad, el proceso a través del cual un núcleo se transforma en otro con la emisión de partículas alfa o beta. Su colaboración culminó en 1918 con el descubrimiento del protactinio, elemento radiactivo notablemente pesado. Sus carreras profesional y científica se desarrollaron a la par: ambos eran investigadores del Instituto Kaiser Wilhelm de Química y cada uno dirigía su propia sección en el centro, Hahn la de radioquímica, Meitner la de física.

Durante los años veinte, Hahn siguió desarrollando técnicas radioquímicas, mientras Meitner se introducía en el joven dominio de la física nuclear. El primero describiría posteriormente este período como la etapa en que el trabajo de Meitner, sobre todo, había aportado al instituto reconocimiento internacional. El prestigio alcanzado y su nacionalidad austríaca la protegieron cuando Hitler subió al poder en 1933; a diferencia de la mayoría de las personas de origen judío, Meitner no fue despedida de inmediato, y a pesar de que muchos de sus alumnos y colaboradores eran

3. LA TABLA PERIODICA de los años veinte y treinta (*abajo a la izquierda*) hacía esperar que los elementos siguientes al uranio fueran elementos de transición. Tras el descubrimiento de varios elementos transuránicos en los años cuarenta, Glenn T. Seaborg observó que los actínidos formaban una segunda serie de tierras raras, homóloga a la de los lantánidos (*tabla periódica de 1995, abajo a la derecha*). En 1994, el elemento 109 recibió la denominación de meitnerio.



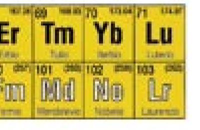


nazis entusiastas, la física le gustaba demasiado para dejarla. Le atraían especialmente los experimentos de Enrico Fermi y su grupo en Roma, quienes habían empezado a usar neutrones para bombardear elementos muy dispares de la tabla periódica.

Fermi observó que, en las reacciones provocadas por neutrones, el núcleo impactado no experimentaba un gran cambio, sino que el neutrón incidente se limitaba a inducir que el núcleo emitiera un protón o una partícula alfa. Observó también que los núcleos de elementos pesados eran más proclives a capturar un neutrón. Si el nuevo núcleo, más pesado, era radiactivo, se desintegraba con la emisión de rayos beta, transformándose en el siguiente elemento de la tabla periódica. Al irradiar con neutrones el elemento más pesado, uranio, Fermi descubrió nuevos emisores beta, ninguno de los cuales mostraba las propiedades químicas del uranio o los elementos que lo precedían en la tabla periódica. Y sugirió con cierta cautela que había sintetizado elementos que se hallaban más allá del uranio en la tabla periódica, fascinando a la comunidad científica internacional.

Meitner había ido verificando, uno a uno, los resultados del grupo de Fermi. Era un trabajo que encajaba de pleno en sus intereses y capacidad experimental. Nuestra física se encontraba, además, en lo mejor de su carrera: no sólo era una de las primeras mujeres en la elite de la ciencia alemana, sino también uno de los expertos nucleares de mayor prestigio. Para analizar en detalle los nuevos elementos "transuránicos", sin embargo, necesitaba la ayuda de un radioquímico experto. Hahn, reacio al principio, aceptó colaborar en la investigación, a la que se incorporó también Fritz Strassmann, un químico analítico del instituto. No habría fricciones de corte político entre ellos: Meitner era "no aria"; Hahn, contrario al régimen nazi, y Strassmann se había negado a ingresar en la Sociedad Alemana de Química, asociada a los nacionalsocialistas, lo que hacía muy difícil que pudiera hallar trabajo fuera del instituto.





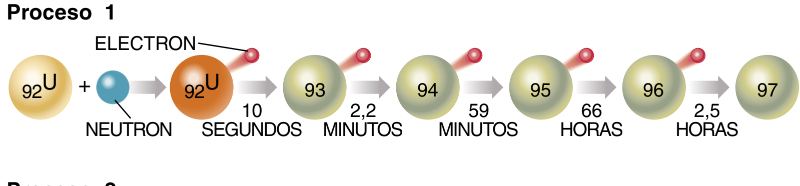
A finales de 1934, el equipo de Berlín informó de que los emisores beta observados por Fermi no se correspondían con ningún elemento conocido. Además, se comportaban de acuerdo con lo esperado en los transuránicos: podían separarse del resto de los productos de la reacción junto con los metales de transición, como los sulfuros de renio y platino. Igual que Fermi, el grupo del Wilhelm sugería que las actividades observadas correspondían a nuevos elementos allende el uranio. Esta interpretación, incorrecta según se vería más tarde, se basaba en dos hipótesis, una de carácter físico y otra de carácter químico, cuya falsedad quedaría, asimismo, denunciada años después.

Por lo que respecta a la física, hasta ese momento se había observado que las reacciones nucleares inducían siempre pequeños cambios, lo que hacía inimaginable un fenómeno como la fisión. La química, por su parte, hacía suponer que los elementos transuránicos serían elementos de transición. No fue extraño cometer semejante error, si tomamos en cuenta el estrecho parecido de la química del torio y el uranio con la de los elementos de transición; los

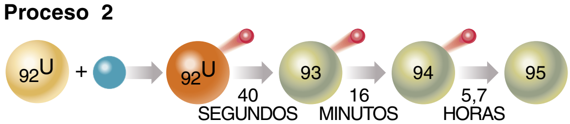
El descubrimiento de la fisión

El grupo de Berlín descubrió que en la colisión entre neutrones y átomos de uranio se formaba un gran número de emisores beta (núcleos radiactivos que emiten electrones). Propusieron dos series, formadas por elementos allende el uranio, cada uno con su propia cadencia o tasa de desintegración:

Proceso 1

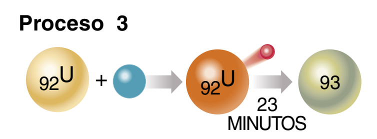


Proceso 2

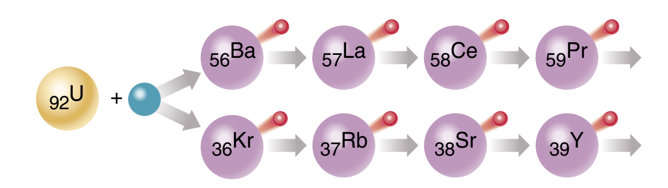


Identificaron, además, una reacción más simple:

Proceso 3



Para Meitner el proceso 3 era el más comprensible. Andando el tiempo se comprobó que estaba en lo cierto. Pero se encontraba desconcertada por los procesos 1 y 2, cuyas series de desintegración eran excesivamente largas y, además, paralelas. Cuando Hahn y Strassmann lograron por fin identificar uno de los productos de reacción como bario, Meitner y Frisch se dieron cuenta de que el núcleo de uranio se había partido en núcleos de bario y kriptón, que desencadenaban nuevas series de emisiones beta:



Estos núcleos y otros fragmentos de la fisión explican las series de desintegración de los procesos 1 y 2. Meitner y Frisch propusieron la expresión "fisión nuclear", publicaron la primera explicación teórica del proceso y predijeron la enorme cantidad de energía liberada. —*R.L.S.*



4. DURANTE LOS AÑOS VEINTE Lise Meitner, profesora y directora de una sección propia, la de física, en el Instituto Kaiser-Wilhelm de Química, alcanzó reputación mundial en física nuclear. Esta fotografía, tomada en 1920 con motivo de la primera visita de Niels Bohr a Berlín, muestra a algunos de sus amigos y colaboradores más próximos; casi la mitad de ellos obtendrían el Nobel. *Primera fila*: Otto Stern (Nobel, 1943), James Franck (1925), Bohr (1922). *El segundo por la derecha*: Gustav Hertz (1925). *A la derecha y detrás de Meitner*: Hahn (1944) y George de Hevesy (1943).



5. OTTO R. FRISCH y Meitner explicaron, en 1939, el proceso de fisión. En Inglaterra, en 1940, Frisch y Rudolf Peierls, otro físico que había emigrado, analizaron el potencial de la fisión nuclear en la fabricación de armas, contribuyendo al lanzamiento del proyecto de bomba atómica de los Aliados.

químicos de los años treinta esperaban de los transuránicos que se comportaran a la manera del renio, el osmio, el iridio o el platino, elementos de transición.

Ambas hipótesis falsas, al imbricarse mutuamente, confundieron la investigación durante varios años. Hahn culparía luego a los físicos, seguros de la pequeñez de los cambios nucleares, de haber impedido el descubrimiento. Pero las publicaciones científicas muestran que, si acaso, los químicos adoptaron una actitud complaciente, siendo la de los físicos más escéptica. La física no predijo la fisión, por supuesto, pero reveló desajustes que la química no podía detectar.

El trío de Berlín intentó separar del uranio y de sus productos de desintegración los presuntos transuránicos, de actividad sumamente débil; la radiactividad natural de aquéllos era, asimismo, mucho más intensa. Tras irradiar con neutrones una muestra de uranio y disolverla, separaron de la solución las substancias cuyo comportamiento químico remedaba el de los metales de transición, usando como portadores compuestos de dichos metales. El precipitado resultante contenía varios emisores beta, que el equipo del Wilhelm empezó a separar trabajosamente.

En el par de años siguientes identificaron dos cadenas paralelas de desintegración beta; los bautizaron sin excesiva imaginación procesos uno y dos. Los elementos de estas series de desintegración mostraban las propiedades que eran de esperar de los elementos que seguían al uranio, es decir, se parecían a los elementos de transición renio, osmio y así sucesivamente. La concordancia entre las series y las predicciones de la química era demasiado evidente para resultar casual. En las monografías publicadas en los *Chemische Berichte* de 1936 y 1937, en las que Hahn aparece como principal firmante, aludían una y otra vez a los transuránicos como elementos “incuestionables”, destacando que no cabía “ninguna duda” sobre su existencia, ni había “necesidad alguna de discutir más la cuestión”.

Mientras, los datos forzaban la física hasta el límite. Meitner se esforzó por elaborar un modelo convincente de los procesos nucleares implicados, que integrara los resultados de la química, la radioquímica y sus propias mediciones físicas. Estableció que los neutrones térmicos, extremadamente lentos, mejoraban el rendimiento de los procesos uno y dos, prueba de que tales episodios comportaban la captura de neutrones. Pero a ese mismo resultado conducían también los neutrones rápidos. En consecuencia, dedujo, ambos procesos se originaban en el uranio 238, su isótopo más abundante. Identificó un tercer proceso —que implicaba la captura de neutrones moderadamente lentos— que no daba pie a una larga serie de desintegraciones beta.

A Meitner le parecía raro que los tres procesos de captura neutrónica se originaran en la misma forma isotópica del uranio. Empezó a sospechar que algo fallaba en los procesos uno y dos. Desde el punto de vista teórico, no podía entender que la captura de un solo neutrón creara una inestabilidad tal, que fueran necesarias cuatro o cinco emisiones beta para relajarla. Y lo que era más duro de digerir: que las dos largas series de desintegración beta formaran secuencias paralelas. No había base teórica para justificarlo.

En 1937 Meitner publicó un artículo en *Zeitschrift für Physik*, donde expresaba que los resultados eran "difíciles de conciliar con nuestra concepción actual de la estructura nuclear".

Una vez reconocida la existencia de la fisión, los investigadores comprendieron que los procesos uno y dos eran episodios de fisión. El uranio se divide en fragmentos altamente radiactivos, que generan una serie de desintegraciones beta. (Hay muchas series distintas como éstas porque el uranio se puede dividir de maneras diversas.) Meitner estaba en lo cierto al considerar al proceso tres como el más normal, ya que el uranio 239 formado en aquella captura neutrónica se transforma mediante una desintegración beta en el elemento 93. En 1940, Edwin MacMillan y Philip Abelson identificaron este elemento, al que más adelante se daría el nombre de neptunio. Si el equipo del Instituto Kaiser Wilhelm hubiera detectado el neptunio, habría observado que se trataba de un elemento del grupo de las tierras raras y se hubiera dado cuenta de que las actividades de los elementos de los procesos uno y dos no correspondían a elementos transuránicos. Pero no podían. Sus fuentes de neutrones eran demasiado débiles para detectarlo.

El error más grave que cometió el grupo de Berlín fue el de separar e investigar sólo las actividades de elementos que presentaban la química de los metales de transición, ignorando el resto. En 1938, Irène Curie y Pavel Savitch, en París, examinaron mediante una técnica distinta la mezcla entera de productos uránicos; hallaron un elemento de actividad nueva e intensa, cuya química no podían determinar. Igual que acontecía con los supuestos transuránicos, su formación venía estimulada por neutrones térmicos. Cuando en el Kaiser Wilhelm se examinó este nuevo elemento, en octubre de 1938, Meitner se había ya visto obligada a huir de Alemania y se encontraba en Estocolmo. Hahn y Strassmann analizaron la actividad de Curie y, tras descubrir que seguía a un portador de bario, lo identificaron como un isótopo del radio.

Meitner y Hahn se mantenían en contacto epistolar permanente; una noche tardaba el correo de Berlín a Estocolmo. Meitner apenas podía creer el último resultado. Para formar radio, el núcleo de uranio tendría que emitir dos partículas alfa, y ella estaba segura de que era imposible, en términos energéticos, que un neutrón térmico arrancara la emisión de una sola partícula alfa, no digamos dos. En noviembre de 1938, visitó el Instituto de Física Teórica de Niels Bohr en Copenhague, donde se reunió con Hahn el 13 de noviembre. El encuentro se mantuvo en secreto para evitarle problemas políticos a éste, quien nunca lo mencionó en sus memorias. Pero sabemos por la propia agenda de Hahn que existió, y que Meitner objetó con denuedo que se formara un isótopo de radio. Este fue el contenido de la reunión que Hahn resumió para Strassmann a su regreso a Berlín.

Según Strassmann, Hahn le dijo que Meitner le había "apremiado" a que verificaran otra vez la presencia de radio. También recuerda Strassmann que "afortunadamente, las opiniones y juicios de Meitner tenían tanta importancia para nosotros, que empezamos en seguida los experimentos de control". Con ellos se proponían corroborar la presencia de radio separándolo parcialmente de su portador de bario. Sin embargo, la separación fracasó, lo que les llevó a la conclusión de que su "radio" era en realidad un isótopo de bario, elemento mucho más ligero que el uranio.



6. FRITZ STRASSMANN colaboró con Meitner y Hahn en las investigaciones que llevaron al descubrimiento de la fisión nuclear. Sus conocimientos en química analítica fueron cruciales para identificar el bario. Un antinazi valeroso, durante la guerra Strassmann ayudó a salvar la vida a un amigo judío.

En diciembre de 1938, justo antes de Navidad, Hahn le contó a Meitner sus ensayos con bario, que le habían llevado a una "conclusión estremecedora". "¡Ya sabemos que el uranio no puede realmente reventar dando bario!" Hahn esperaba de Meitner una "explicación fantástica". Meitner replicó a vuelta de correo. Aunque le parecía difícil concebir un "reventón de tanto alcance", le aseguró que "ya de nada se puede decir: es imposible". Su carta debe haber sido el mejor regalo de Navidad que Hahn recibiera nunca. Ella se había opuesto firmemente a la presencia de radio, pero ahora estaba dispuesta a considerar al bario como una extensión, y no como una contradicción, de las teorías aceptadas.

Hahn comentaría más tarde que, de hallarse Meitner en Berlín, le hubiera quitado el resultado del bario de la cabeza y le hubiera "prohibido" realizar el descubrimiento. Pero la carta de Meitner, que siempre estuvo en posesión de Hahn, demuestra todo lo contrario. Hahn debió encontrarla reconfortante en su momento, pues sólo después de recibirla añadió un párrafo a las pruebas de imprenta de su artículo sobre el bario, sugiriendo que el núcleo de uranio se había partido en dos. Meitner sintió amargamente no poder disfrutar de su parte en este "precioso descubrimiento", como lo llamó, pero ambos sabían que era imposible incluir a una "no aria" en la publicación.

Por Navidad, Meitner visitó a una amiga en el oeste de Suecia. Para reunirse con ella llegó desde el instituto de Bohr su sobrino Otto Frisch. El encuentro familiar supuso también la convergencia de diferentes vertientes de la teoría nuclear. Tía y sobrino, que hasta entonces imaginaron el núcleo como una suerte de gota líquida, comenzaron a asociarlo a una

gota inestable y oscilante, lista para partirse en dos. Frisch advirtió que la tensión superficial en un núcleo del tamaño del de uranio sería extremadamente pequeña. Meitner calculó mentalmente el defecto de masa y estimó la cantidad enorme de energía generada por la masa perdida al dividirse el núcleo. Todo encajaba: la interpretación teórica representaba en sí misma un importante descubrimiento, y fue reconocida como tal. La comunidad física adoptó inmediatamente el término "fisión" propuesto por Frisch y Meitner. Bohr se basó en el trabajo de ambos para generalizar la teoría nuclear.

El hallazgo sobre el bario de Hahn y Strassmann apareció en *Naturwissenschaften* en enero de 1939; Meitner y Frisch publicaron su interpretación en *Nature* pocas semanas después. A primera vista parecía que el descubrimiento de la fisión estaba perfectamente dividido entre química y física, experimento y teoría, alemanes y refugiados. Para aquellos que no entendían de ciencia o se desinteresaban de la política, los químicos habrían descubierto la fisión, mientras los físicos se habían limitado a dotarla de un bastidor teórico.

En las semanas siguientes al descubrimiento, Hahn sacó partido a esa división artificiosa. Aunque sabía que la emigración forzosa de Meitner era injusta y que ella había participado de pleno en el hallazgo, no podía confesarlo en voz alta. Temía por su futuro y su posición en el instituto; temía en particular que alguien se enterara de que él y Strassmann habían seguido colaborando con Meitner. Decidió, por tanto, confinar el descubrimiento de la fisión a los experimentos químicos que él y Strassmann habían realizado en diciembre. En febrero de 1939 escribió a Meitner que "nunca recurrimos a la física, sino que realizamos una separación química tras otra", y describió la fisión como un "regalo caído del cielo", un milagro que le protegía a él y al instituto.

La verdad es que, se vio luego, no hubiera sido necesario que Hahn abjurara de Meitner y de la física para que el "milagro" se produjera. Aquella primavera, los militares alemanes se interesaron por las aplicaciones potenciales del descubrimiento, y para el verano de 1939 Hahn y el instituto se hallaban protegidos. Como recordaría más adelante, "la fisión nos permitió salvar la situación".

Tras la explosión de la bomba atómica, la fisión ocupó las primeras páginas de los periódicos. La fama de Hahn creció. En la Alemania de posguerra, Hahn fue para toda una generación una figura nacional, un premio Nobel y un alemán decente que no había cedido a los nazis, el científico que no había construido la bomba. Pero su actitud para con Lise Meitner distó mucho de ser honrada. Ni una sola vez en sus numerosos artículos, entrevistas, memorias o autobiografías mencionó la iniciativa de Meitner en la investigación del uranio, su liderazgo del grupo de Berlín o su colaboración continuada desde el exilio. Hahn murió en Gotinga en 1968, a los 89 años de edad.

La situación profesional de Meitner en Suecia, durante la guerra, era de perfil bajo. Sus amigos estaban convencidos de que se le hubiera concedido el premio Nobel de haber emigrado a cualquier otro lugar. En 1943, Meitner fue invitada a participar en la fabricación de la bomba atómica en Los Alamos, pero no aceptó. Por un breve espacio de tiempo, al final de la guerra, se convirtió en una celebridad en los Estados Unidos y Gran Bretaña, al ser erróneamente presentada como la refugiada judía que había escapado de los nazis con el secreto de la bomba. Pero Meitner era una persona introvertida que detestaba la publicidad, y nunca escribió una autobiografía ni autorizó una biografía. En 1960 dejó Estocolmo por Cambridge, donde murió en 1968, pocos días antes de cumplir noventa años. Desgraciadamente, faltaban treinta para que recibiera el reconocimiento debido por su trabajo.

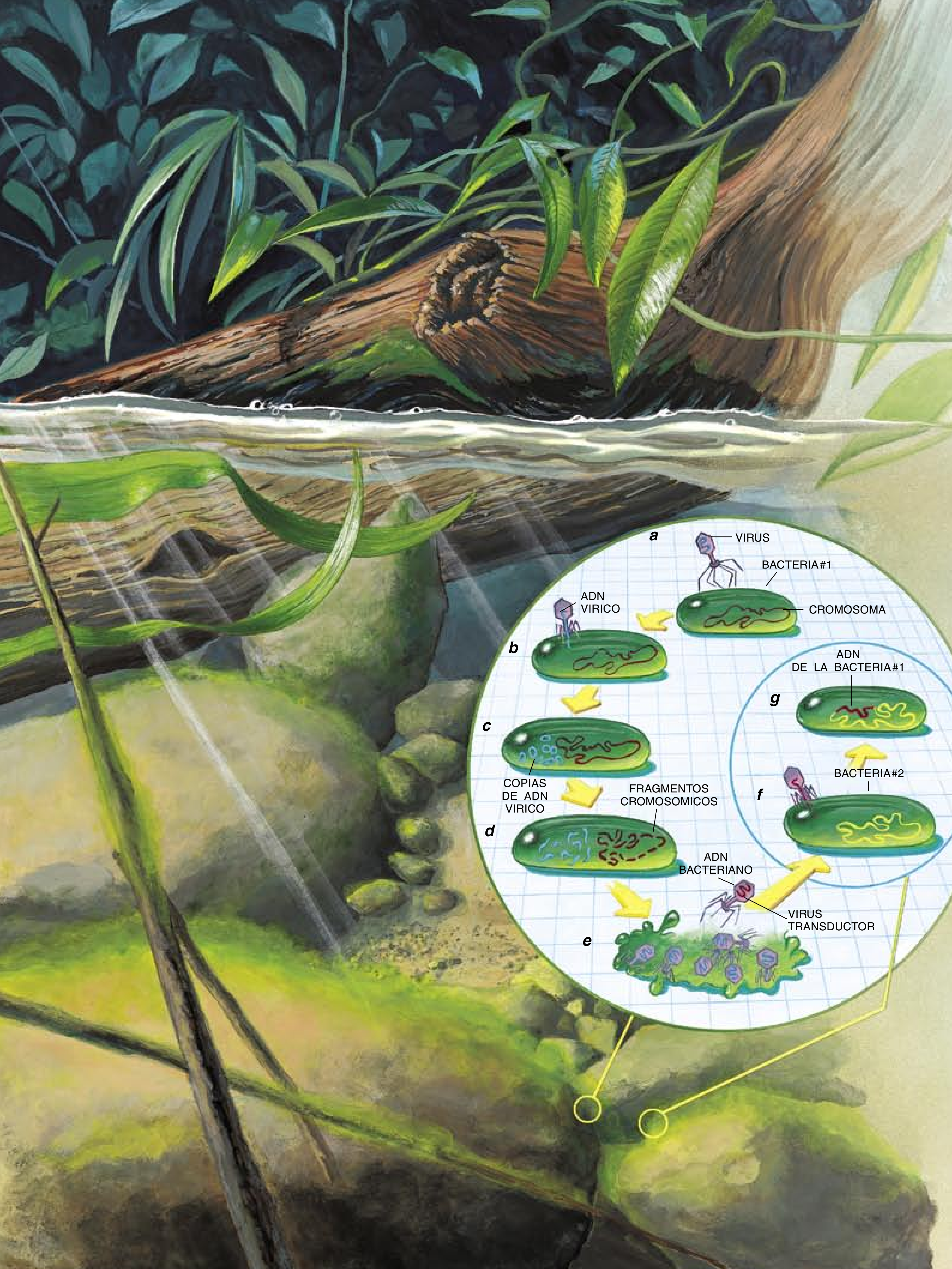
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LOOKING BACK. Lise Meitner en *Bulletin of the Atomic Scientists*, volumen 20, páginas 1-7; noviembre 1964.

WHAT LITTLE I REMEMBER. Otto R. Frisch. Cambridge University Press, 1979.

IM SCHATTEN DER SENSATION: LEBEN UND WIRKEN VON FRITZ STRASSMANN. Fritz Kraft. Verlag Chemie, Weinheim, 1981.

A NOBEL TALE OF POSTWAR INJUSTICE. Elisabeth Crawford, Ruth Lewin Sime y Mark Walker en *Physics Today*, vol. 50, núm. 9, páginas 26-32; septiembre 1997.



a
VIRUS
BACTERIA#1
CROMOSOMA
ADN
VIRICO
b
ADN
DE LA BACTERIA#1
g
c
COPIAS
DE ADN
VIRICO
FRAGMENTOS
CROMOSOMICOS
BACTERIA#2
f
d
ADN
BACTERIANO
VIRUS
TRANSDUCTOR
e

Intercambio de genes bacterianos en la naturaleza

Los genes pasan de unas bacterias a otras con mayor frecuencia de lo que pensábamos. El dominio del proceso permitirá reducir los riesgos que conlleva la liberación de microorganismos genéticamente modificados al entorno

Robert V. Miller

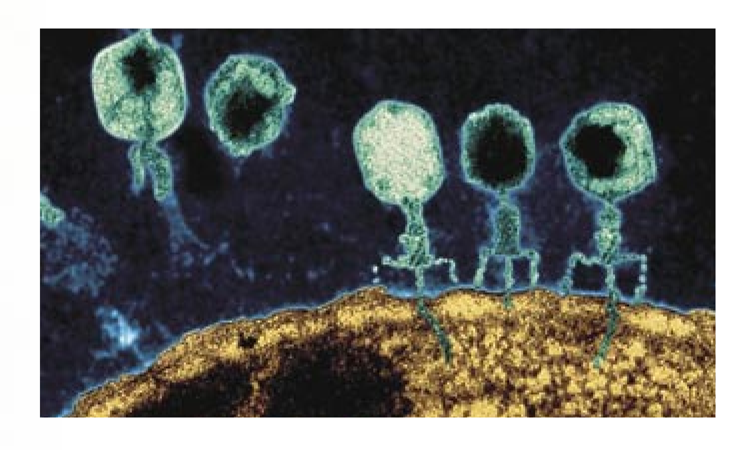
A principios de los años ochenta, coincidiendo con el desarrollo de las primeras técnicas que permitían introducir genes foráneos en bacterias, algunos investigadores comenzaron ya a sugerir posibles aplicaciones benéficas para el entorno. Proponíase, por ejemplo, la utilización de bacterias modificadas por ingeniería genética para limpiar vertidos de petróleo o para proteger los cultivos de la acción de depredadores y patologías. Estas iniciativas en pro de una suerte de biotecnología ambiental recibieron fuertes críticas.

Entonces, como ahora, el temor era que los microorganismos alterados pudiesen desmandarse o que sus genes pasaran a otros organismos, un fenómeno conocido como transferencia "horizontal" de genes (para distinguirlo de la transferencia "vertical" que es la que tiene lugar entre padres e hijos). Los daños irreparables que este tipo de circunstancias podrían causar al ambiente, a los animales o a las personas, eran motivo de preocupación. Algunos advertían incluso sobre la posibilidad de que esos organismos no naturales arrasaran la Tierra. Los periódicos sensacionalistas ya no centraban sus temores en los ataques procedentes del espacio exterior. El peligro, ahora, eran los microorganismos alterados genéticamente por el hombre, que acabarían devorando el entorno.

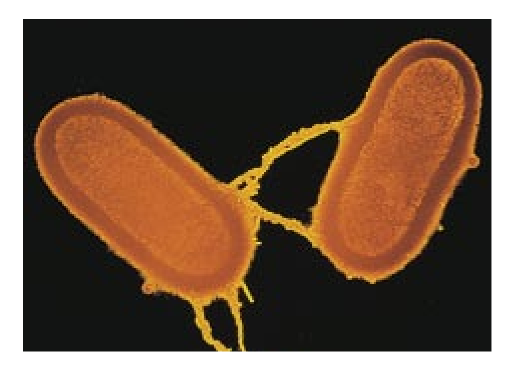
Por aquellos años la biología carecía de argumentos sólidos con que responder a tales augurios. No se conocía apenas nada sobre el desenvolvimiento en la naturaleza de los organismos sometidos a manipulación genética, ni sobre la posibilidad de que los genes bacterianos, innatos o introducidos artificialmente, se transmitiesen a otros hospedadores. Hoy día, gracias a la cooperación entre genética y ecología microbiana, disciplina que se ocupa de los microorganismos en su ambiente natural, empezamos a comprender esos sistemas.

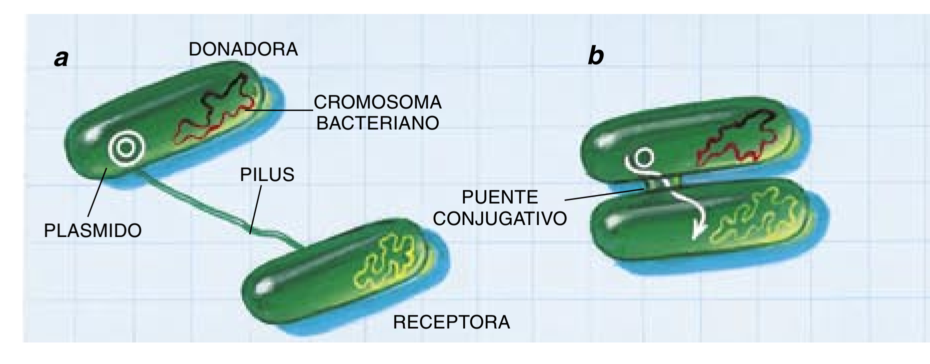
Son ya dos, al menos, las estirpes bacterianas modificadas genéticamente que han conseguido la autorización (para su aplicación en agricultura) de la Agencia de Protección Ambiental norteamericana. Los experimentos de campo realizados se han multiplicado por decenas. Esos experimentos y otras investigaciones más generales sobre la transferencia de genes entre bacterias en su medio natural, indican que es improbable que las bacterias sometidas a manipulación genética proliferen sin control. Ese tipo de bacterias suelen ser frágiles y mueren con relativa rapidez. No es probable, pues, que sus genes gocen de muchas posibilidades para propagarse.

En determinadas circunstancias, sin embargo, los genes pueden, en principio, introducirse en otras bacterias o incluso en otros organismos. Para soltar microorganismos a la naturaleza sin miedo resulta imprescindible, por tanto, conocer las condiciones que estimulan o impiden a bacterias específicas transferir sus genes a otros organismos, una tarea en la que mi laboratorio de la Universidad estatal de Oklahoma se halla empeñado. Hay, además, otros grupos. Con ese tipo de información, los biólogos podrían seleccionar bacterias que tuviesen menos probabili-



1. TRANSFERENCIA GENICA mediante transducción. Se produce entre bacterias que viven en el epiliton, o película gelatinosa, que recubre las rocas sumergidas de los ríos (*izquierda*). La transducción acontece cuando un bacteriófago (virus que infecta a bacterias) se adhiere a una bacteria y le inyecta su ADN (a *y* b *en el dibujo de la izquierda; micrografía de la derecha*). En el interior de la bacteria, el ADN inyectado se replica (*c*) y el cromosoma de la bacteria se degrada (*d*). Lo normal es que el ADN vírico se empaquete en nuevas partículas víricas, que salen al exterior tras la lisis de la célula (*e*). Durante la transducción, sin embargo, algunas partículas capturan ADN bacteriano (con genes bacterianos) y lo transportan hasta una segunda bacteria (*f*), que puede terminar incorporándolo en su propio cromosoma (*g*).





2. LAS BACTERIAS PUEDEN TRANSFERIR PLASMIDOS, que son círculos de ADN, mediante conjugación. En las bacterias gram-negativas, una célula donadora produce estructuras protuberantes (pili) que establecen contacto con una célula receptora, facilitando así el acercamiento de las dos bacterias (*micrografía y a*). A continuación se forma un puente (en realidad un poro) entre las dos células. Por dicho poro pasa a la bacteria receptora una de las cadenas del ADN plasmídico (*b*), regenerándose después una molécula de cadena doble a partir de cada una de las cadenas simples (*c*). Concluida la transferencia, las bacterias se separan (*d*). En la bacterias gram-positivas la conjugación es similar. Con todo, para atraerse las bacterias no utilizan pili sino señales químicas.

dad de intercambiar genes con otros organismos allá donde se aplicaran. Por ejemplo, si han de soltarse en un lago, habría que emplear bacterias que no intercambiaran genes en el agua.

No podemos todavía confeccionar una lista acabada de las mejores bacterias para cada situación. Sin embargo, las investigaciones realizadas hasta la fecha han suministrado bastante información sobre la ocurrencia en la naturaleza de los procesos de transducción, conjugación y transformación, las tres formas habituales de transferencia genética horizontal.

Esos descubrimientos constituyen el eje central de este artículo, si bien debo señalar que el conocimiento de las condiciones que facilitan la transferencia génica horizontal entre bacterias guarda también una relación muy directa con el incremento de la resistencia a antibióticos entre bacterias patógenas. Las bacterias, que son unicelulares, suelen transmitir genes de resistencia a antibióticos a otras especies de bacterias en el interior del cuerpo humano. Si conociésemos cuándo y cómo ocurre esa transferencia, se podrían desarrollar estrategias para bloquearla.

ROBERT V. MILLER, formado en la Universidad de Illinois, es profesor y jefe del departamento de microbiología y genética molecular de la estatal de Oklahoma desde 1991. Comenzó su carrera académica en 1974, en la Universidad de Tennessee en Knoxville. En 1980 se trasladó a la Loyola de Chicago. Ha sido miembro del Comité Asesor de Biotecnología de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

En un plano más teórico, el descubrimiento de que la transferencia génica horizontal es un hecho común en la naturaleza sugiere que, en el curso de la evolución, el proceso pudo haber contribuido a generar la gran diversidad genética que hoy observamos entre las bacterias. A tenor de ciertos descubrimientos, se habrían intercambiado genes entre los tres grupos principales de organismos, esto es, bacterias, eucariotas (animales, plantas, hongos y protozoos) y *archaea* (microorganismos ancestrales que comparten propiedades de bacterias y eucariotas). La información disponible sugiere que se ha producido transferencia génica de bacterias a eucariotas, de bacterias a *archaea* y, especialmente, de eucariotas a bacterias. El intercambio génico horizontal puede, por tanto, haber influido en la evolución de tipos biológicos.

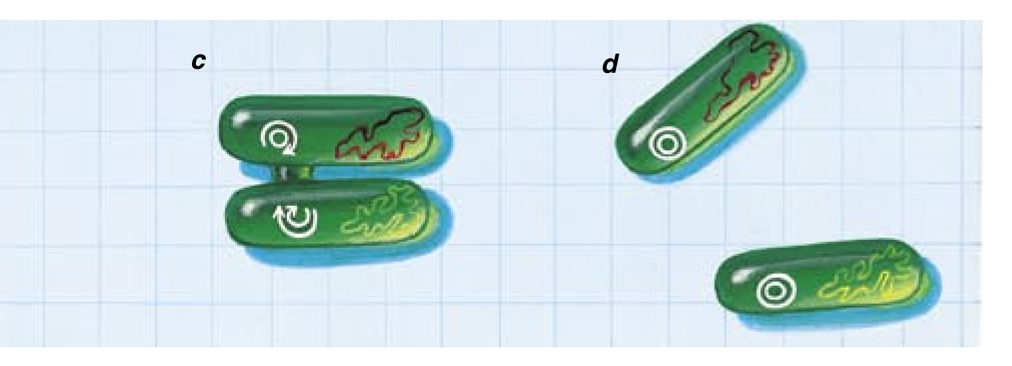
Mi interés por la transferencia génica horizontal en la naturaleza se remonta a la primavera de 1976. Estaba contratado por la Universidad de Tennessee en Knoxville; en mi calidad de genético, me interesaba el funcionamiento de las células. Sabía que ciertas bacterias podían transmitir genes a otras bacterias de una forma natural. Desde mi punto de vista, no obstante, la transferencia génica horizontal no encerraba mayor importancia que la de constituir un proceso práctico de introducir nuevos genes, y por tanto nuevos caracteres, en las células que estudiábamos en el laboratorio.

Un paseo en barca un sábado por la tarde con Gary Sayler, otro joven profesor de la universidad, rompió mis estrechos esquemas. Sayler, ecólogo microbiano, quería saber si yo tenía idea de la cantidad de intercambio genético que se daba entre las bacterias de nuestro lago. Deduje que la tasa de intercambio genético debía ser baja, ya que el contacto entre las bacterias, muy dispersas en el agua, sería poco frecuente. Ante su insistencia, tuve que admitir mi ignorancia sobre casi todo lo concerniente a la transferencia génica horizontal en la naturaleza.

El lunes siguiente, esperando encontrar abundante bibliografía sobre el tema, me encerré en la biblioteca. Después de varias horas comprobé, sorprendido y decepcionado, que no se sabía nada al respecto.

Sayler, sin embargo, andaba eufórico. Acababa de idear un dispositivo para estudiar organismos vivos en agua dulce que nos permitiría medir la cantidad de transducción que se produce en el agua y llenar así un vacío científico importante. Durante el otoño y la primavera siguientes realizamos nuestros primeros ensayos, que demostraban que se producía transducción en agua dulce.

En 1978 publicamos los resultados. Suponíamos que otros compartirían nuestra inquietud y se multiplicarían los proyectos de investigación sobre intercambio de genes bacterianos en la naturaleza. Pero las instituciones que financiaban los proyectos debían de pensar de forma muy distinta. Hasta que en 1985 la situación dio un vuelco. No fueron ajenos al cambio los temores que suscitaba la liberación de bacterias modificadas mediante ingeniería ge-



nética al entorno. Sayler y yo nos pusimos rápidamente al día. Empezamos a investigar las posibilidades de transferencia génica horizontal en todo un abanico de situaciones.

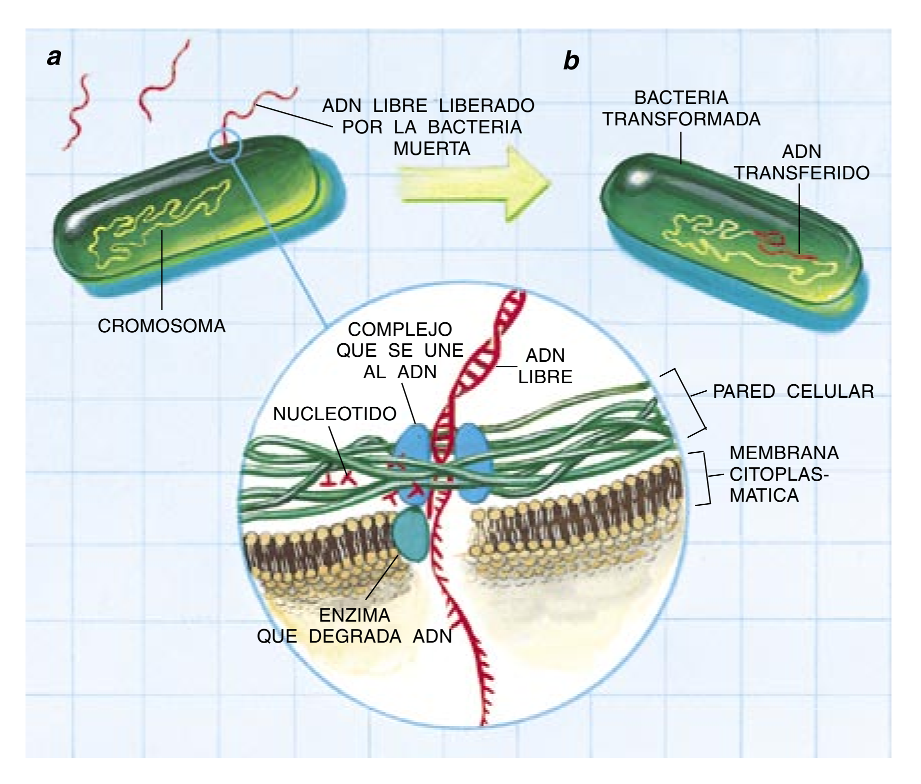
La conjugación, proceso mediante el cual las bacterias diseminan material genético fuera del laboratorio, había sido el primer mecanismo de transferencia génica estudiado. Ese mecanismo se identificó en 1946, cuando Joshua Lederberg y Edward Tatum, de la Universidad de Yale, encontraron que la enterobacteria *Escherichia coli* utilizaba un proceso de tipo sexual para intercambiar elementos de ADN circular, o plásmidos.

Los plásmidos portan genes, pero son estructuras independientes del cromosoma bacteriano. Este, mucho mayor, contiene los genes necesarios para la reproducción bacteriana. (También los cromosomas se pueden intercambiar mediante conjugación, aunque sólo en circunstancias excepcionales.) A menudo, los plásmidos portan genes que aumentan la posibilidad de supervivencia en condiciones hostiles. Por ejemplo, además de incluir los genes necesarios para su propia replicación y transferencia, a menudo portan genes que cifran proteínas que confieren a las bacterias resistencia a antibióticos, que les permiten degradar compuestos tóxicos como los bifenilos policlorados (PCB) o que les facultan para transformar mercurio u otros metales pesados en formas menos tóxicas.

Por razones históricas, los microbiólogos clasifican a las bacterias en dos tipos: gram-negativas y gram-positivas, según retengan un determinado colorante. Se sabe que en las bacterias gram-negativas, que son las que no retienen el colorante, la conjugación comienza cuando la bacteria donadora entabla contacto —mediante un apéndice llamado "pilus"— con una bacteria receptora que presenta en su superficie un receptor para dicho pilus. Después del contacto, el pilus se retrae, consiguiendo así que las bacterias donadora y receptora queden estrechamente unidas. Suele ocurrir que muchas bacterias donadoras despliegan sus pili al mismo tiempo y son varias las bacterias de este tipo que pueden converger a la vez en una misma receptora. Como consecuencia de ello, se producen agregaciones de bacterias. Cuando aparece este tipo de agregaciones, se forman poros o puentes entre las células donadora y receptoras a través de los cuales pasan los plásmidos de una a otra.

Algunos pili promueven la agregación de bacterias en medio líquido y en superficies sólidas. Otros sólo lo hacen eficazmente en superficies sólidas. Por ello, los investigadores que deseen introducir bacterias gram-negativas modificadas genéticamente en un medio acuático, deben seleccionar especies con pili que induzcan agregación sólo en superficies sólidas.

En las bacterias gram-positivas la conjugación no está mediada por pili. Antes de la conjugación, la aspirante a recibir nuevos genes secreta sustancias que estimulan la síntesis de factores aglutinantes por las potenciales donadoras; estas proteínas poseen capacidad para agregar unas bacterias a otras. Una vez que las bacterias se asocian, se forman los poros necesarios para la transferencia del ADN. Según esto, si se elige una bacteria gram-positiva recombinante para soltarla en un entorno donde haya otras bacterias gram-positivas, se puede conjurar el riesgo de transferencia génica en ese lugar, alterando la bacteria de suerte



3. LA TRANSFORMACION bacteriana es un proceso (*a*) en el que las células absorben ADN libre liberado por una bacteria muerta. El ADN es atrapado e introducido por un complejo proteínico capaz de unirse al ADN (*detalle*), presente en la superficie de la bacteria. Durante el proceso, ciertas enzimas degradan una de las dos cadenas de la molécula. La otra puede acabar integrándose en el cromosoma de la bacteria (*b*). Aunque el dibujo se refiere a la transformación en bacterias gram-positivas, también puede ocurrir en bacterias gram-negativas; en este caso a través de un mecanismo distinto.

Ambientes en los que se ha observado transferencia génica horizontal

	TRANSDUCCION	CONJUGACION	TRANSFORMACION
AMBIENTES TERRESTRES	Suelos, superficies de plantas	Suelos, superficies de plantas	Suelos
AMBIENTES ACUATICOS	Lagos, océanos, ríos, zonas de tratamientos de aguas residuales	Lagos, océanos, sedimentos marinos, ríos, epiliton (capas gelatinosas que recubren las piedras de los ríos), zonas de tratamientos de aguas residuales	Sedimentos marinos, ríos, epiliton de las piedras de los ríos
EN EL INTERIOR DE ORGANISMOS	Crustáceos, ratones	Plantas, insectos, gallinas, ratones, humanos	Plantas, insectos, ratones

tal que se torne incapaz de sintetizar factores aglutinantes.

En general, las bacterias gram-negativas y gram-positivas, que pueden coincidir en medios naturales acuáticos y terrestres, intercambian plásmidos exclusivamente con miembros de su propio grupo. Muchas restringen el intercambio a su propia especie. Algunos plásmidos "promiscuos", sin embargo, pueden transferir ADN entre especies sin parentesco, esto es, entre bacterias gram-negativas y gram-positivas, e incluso de bacterias a levaduras y plantas. Ni que decir tiene que las bacterias que portan plásmidos promiscuos son poco recomendables fuera del laboratorio.

¿Es tan frecuente la conjugación en la naturaleza como para justificar las precauciones que sugieren los experimentos de laboratorio? Desde los años ochenta, cuando nace la biotecnología ambiental, ha quedado demostrado que se produce conjugación en ambientes naturales muy dispares: en el agua, en el suelo, en plantas y animales.

John C. Fry, Martin J. Day y sus colaboradores, de la Universidad de Gales, han demostrado que se puede producir transferencia génica por conjugación entre bacterias que habitan en agua dulce. Hallaron que la conjugación posibilita que una estirpe de laboratorio de la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* incorpore un plásmido que, de forma natural, proporciona resistencia al mercurio en bacterias que habitan en las aguas del río Taft, cerca de Cardiff. *P. aeruginosa* es una bacteria, común en el suelo y en aguas dulces, que causa infecciones de las vía respiratorias y urinarias en personas con las defensas inmunitarias debilitadas.

Los investigadores provocaron mutaciones en un gen de *P. aeruginosa*, generando una versión anormal de la proteína especificada por el gen intacto. La proteína alterada serviría más tarde de marcador para seguir la pista de bacterias liberadas al río. Las bacterias marcadas se introdujeron en las películas ricas en nutrientes, o epiliton, que cubren las piedras sumergidas de los ríos. (Las piedras se envolvieron con un material poroso muy fino para evitar que las bacterias se escapasen.)

A las 24 horas, los investigadores recogieron las piedras y examinaron el epiliton, buscando las células de *P. aeruginosa* marcadas que hubiesen incorporado el plásmido de resistencia al mercurio, presente en las poblaciones naturales de *P. aeruginosa* de las rocas. La proporción de *P. aeruginosa* introducidas que incorporaron el plásmido osciló entre 1 de cada 10.000 y 1 de cada mil millones, pero era indudable que la transferencia se había producido. Estos trabajos permitieron también obtener una información valiosa relativa al efecto de la temperatura del agua, el nivel de acidez y la concentración de nutrientes sobre la frecuencia de la conjugación.

Se ha comprobado que algunos factores ambientales no modulan la conjugación en la naturaleza de la misma forma que lo hacen en el laboratorio. En los ensayos de Fry y Day, la conjugación se producía a una temperatura de entre 6 y 18 grados C, un valor demasiado bajo para la conjugación en estirpes bacterianas de laboratorio. Estos resultados, inesperados, indican cuán necesario es estudiar la conjugación en la naturaleza para conocer las condiciones en las que ésta es poco frecuente.

Gracias a los trabajos de los grupos encabezados por Fry y Day se sabe ya que, si bien las bacterias utilizan la conjugación para transferir información genética en muchos ambientes distintos, los plásmidos alterados genéticamente no revisten ningún peligro. Los plásmidos frenan la tasa de crecimiento de las bacterias y suelen acabar eliminados si no representan ninguna ventaja para el organismo que los porta. Si un plásmido, sujeto a manipulación genética, que confiere resistencia al mercurio, termina introduciéndose en un organismo que vive fuera de un entorno contaminado de mercurio, el nuevo hospedador se desembarazará prestamente de él.

Además, rara vez, por no decir nunca, los plásmidos se integran en el cromosoma bacteriano. En consecuencia, aun cuando se introduzcan en una nueva bacteria, no formarán parte estable del genoma hospedador. Cada

vez que una célula bacteriana se reproduce, su cromosoma se copia y se distribuye a las nuevas generaciones de bacterias, pero la reproducción de los plásmidos no va acompasada con la división bacteriana. Para eliminar toda posibilidad de que un gen introducido en una bacteria manipulada por ingeniería genética se propague mediante conjugación, los biotecnólogos que trabajan con bacterias recombinantes susceptibles de soltarse a la naturaleza han optado por insertar los genes en los cromosomas, no en los plásmidos.

Aunque la conjugación fue el primer mecanismo de transferencia génica entre bacterias estudiado a fondo en la naturaleza, no fue el primero que se identificó. Los estudios de transferencia génica entre bacterias comenzaron en 1928, cuando Frederick Griffith, microbiólogo británico, observó que ciertas bacterias neumocócicas no virulentas se volvían virulentas cuando, mezcladas con otros neumococos virulentos muertos, se inyectaban en ratones. Griffith concluyó que las bacterias no virulentas se volvían virulentas y mataban a los ratones porque adquirían un agente "transformante" procedente de las bacterias virulentas muertas. Ahora sabemos que ese agente transformante es el ADN, que se liberaba al medio cuando las bacterias muertas se rompían. Se dice que hay transformación para un gen determinado cuando éste se adquiere a través de un plásmido o si se integra en el cromosoma de una célula receptora como parte de un fragmento de ADN.

Lo mismo en bacterias gram-negativas que en gram-positivas la transformación natural requiere que el ADN libre sea estable y que las células potencialmente receptoras estén capacitadas para incorporarlo. Esto es, las receptoras deben presentar en su superficie proteínas especializadas que se unan al ADN y lo introduzcan en el interior.

Hasta hace poco, los investigadores suponían que la transformación debía ser selectiva; creíase que el ADN libre no sería lo suficientemente estable en el suelo ni en el agua. Pero los estudios de Michael Lorenz y Wilfried Wackernagel, de la Universidad de Öldenburg, Guenter Stotky, de la Universidad de Nueva York, y otros han demostrado que el ADN libre puede estabilizarse asociándose con componentes del suelo y que ese ADN pueden absorberlo células competentes. En fecha más reciente se ha comprobado la transferencia de ADN plasmídico mediante transformación en aguas fluviales y en el epiliton presente en las piedras de los ríos. (Pero no tengo noticia de que se haya demostrado la transferencia de genes cromosómicos, mediante transformación, en medios acuáticos o terrestres.)

Pese a todo, la mayoría se muestra reticente a aceptar que entre las bacterias manipuladas genéticamente y liberadas al medio ambiente se pueda producir fácilmente intercambio génico mediante transformación. La transformación natural parece ocurrir sólo entre células de la misma especie; no abundan las especies bacterianas capaces de devenir competentes para la transformación. Basta con que los biotecnólogos no utilicen esas especies en sus experimentos.

Además, aunque las bacterias muertas pueden a veces liberar grandes cantidades de ADN absorbible por otras bacterias, ese ADN no suele estar intacto. El grupo de John Paul, de la Universidad del Sur de Florida, ha demostrado que en las aguas de las rías, al amanecer, cuando muchas bacterias mueren y liberan su material genético, se producen altas concentraciones de ADN bacteriano libre. Sin embargo, en experimentos de laboratorio, los investigadores han observado que el ADN liberado y recuperado por bacterias no tarda en degradarse en sus componentes esenciales, para su reutilización en la síntesis de nuevo ADN. Es muy raro que los genes presentes en el ADN libre permanezcan enteros.

A diferencia de la transformación, la tercera forma de transferencia génica horizontal, la transducción, puede ocurrir en muchos tipos de bacterias. En la transducción, los bacteriófagos (virus que infectan a bacterias) capturan material genético de una célula bacteriana y lo depositan en otra.

El ciclo de vida de los bacteriófagos comienza cuando éstos se unen a las bacterias e inyectan dentro su ADN. Este ADN sirve de molde para fabricar más copias del bacteriófago, que acaban lisando la bacteria infectada y saliendo al exterior para infectar otras bacterias. A veces, sin embargo, algunas de las nuevas partículas incorporan ADN bacteriano en vez de vírico. Los bacteriófagos están capacitados para transferir entre bacterias plásmidos completos y fragmentos de cromosomas. (El cromosoma completo es demasiado grande para ser introducido dentro de un bacteriófago.) Experimentos de laboratorio indican que algunos bacteriófagos pueden infectar distintas especies e incluso géneros de bacterias, lo que sugiere que pueden diseminar genes bacterianos mucho más allá del sitio donde capturaron los genes.

Puesto que la transducción parecía ser el mecanismo capaz de producir un mayor grado de dispersión de un gen foráneo, mis colegas y yo nos concentramos en su estudio. En un principio, intentamos detectar el proceso de transducción en bacterias crecidas en un dispositivo similar al inventado por Sayler. Consistía en un tubo de plástico transparente, cerrado en ambos extremos con filtros que permitían el paso de agua y nutrientes, pero no de las bacterias. Ahora usamos saquitos de plástico permeables a los gases.

Con los resultados obtenidos hemos hilvanado una hipótesis explicativa de la dispersión de material genético, mediante transducción, desde una bacteria introducida en la naturaleza hacia una población de bacterias nativas. De acuerdo con nuestro modelo, toda bacteria con un nuevo gen introducida en un determinado hábitat acaba infectada por bacteriófagos que se reproducen en su interior. Si alguna de las nuevas partículas de bacteriófagos captura el nuevo gen, éste puede terminar introducido en la población indígena de bacterias. El modelo abarca también la transducción de ADN cromosómico y plasmídico. Nos propusimos demostrar que nuestro modelo funcionaba en agua dulce. Y, en efecto, tras aislar bacterias y bacteriófagos de diferentes lagos, hemos comprobado que las bacterias de esos sitios comparten información genética, que ha debido transmitirse mediante transducción.

Muchos microbiólogos pensaban que la transducción no podía constituir un mecanismo principal de intercambio génico en la naturaleza. El proceso requiere la interacción entre virus y bacterias, ambos, así se creía, presentes en concentraciones excesivamente bajas para que se dieran tales encuentros. Pero nosotros hemos detectado en agua dulce y salada concentraciones de bacteriófagos muy elevadas (hasta 100.000 millones de partículas por mililitro). Estas observaciones han llevado a reconsiderar la frecuencia con que se producen interacciones, transducción incluida, entre los bacteriófagos y sus hospedadores.

En el estado actual de la cuestión se acepta la existencia de factores naturales que limitan probablemente la transducción de genes en bacterias manipuladas mediante ingeniería genética. Uno es que la mayoría de los bacteriófagos infectan sólo a una especie bacteriana, no a muchas especies distintas. Además, en la naturaleza, la mayoría de los bacteriófagos infectan sólo a bacterias que son nativas del mismo hábitat que el bacteriófago, no a las estirpes bacterianas de laboratorio utilizadas en ingeniería genética. En última instancia, los biólogos moleculares deberán también equipar a las bacterias alteradas genéticamente con caracteres que restrinjan la capacidad del ADN de moverse a otras especies y sobrevivir en ellas. Ya se está estudiando ese tipo de frenos.

Los biólogos pueden manipular el patrimonio genético de los organismos, sin apenas excepción. No sólo aplican esa técnica a la creación de bacterias recombinantes, sino también a la mejora vegetal para obtener plantas resistentes. Los estudios realizados con bacterias en su medio natural permiten asegurar que no hay peligro en soltar organismos sometidos a manipulación genética. Lo importante es saber si cumplirán la misión asignada. En cualquier caso, no sobra la prudencia. Cuanto mejor conozcamos la transferencia génica horizontal, más información tendrán los biotecnólogos ambientales para reducir los riesgos al mínimo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GENE TRANSFER IN THE ENVIRONMENT. Dirigido por Stuart B. Levy y Robert V. Miller. McGraw-Hill, 1989.

GENETIC INTERACTIONS AMONG MICROORGANISMS IN THE NATURAL ENVIRONMENT. Dirigido por E. M. H. Wellington y J. D. van Elsas. Pergamon Press, 1992.

RELEASE OF GENETICALLY ENGINEERED AND OTHER MICRO-ORGANISMS. J. C. Fry y M. J. Day. Cambridge University Press, 1992.

STRATEGIES AND MECHANISMS FOR FIELD RESEARCH IN ENVIRONMENTAL BIOREMEDIATIONS. Robert V. Miller y Jeanne S. Poindexter. American Academy of Microorganismology, Washington, D.C., 1994.

HORIZONTAL GENE TRANSFER. Dirigido por M. Syvanen y C. Kado. Chapman and Hall (en prensa).

Almacenamiento de residuos radiactivos en el subsuelo oceánico

Por mucho que inquiete a los movimientos ecologistas, merece la pena abordar la posibilidad de enterrar los residuos radiactivos bajo sedimentos oceánicos

Charles D. Hollister y Steven Nadis

En la profundidad de los océanos se hallan en equilibrio estático las inmensas placas tectónicas que están recubiertas por un manto espeso de sedimentos que, a primera vista, diríase que carece de valor. La roca que se encuentra debajo de estas llanuras abisales se cubre con una capa de sedimentos de cientos de metros de espesor, de composición arcillosa, con aspecto oscuro, como si fuera chocolate negro, y de consistencia parecida a la mantequilla de cacahuete. La ausencia de vida vegetal y la escasez de fauna marina hacen que estas regiones sean bastante improductivas desde el punto de vista biológico y carezcan de riqueza mineral.

Sin embargo, estos fondos pueden guardar un valor inmenso para resolver dos problemas que preocupan a la humanidad desde el inicio de la era nuclear. Las mencionadas formaciones suboceánicas podrían aportar una solución permanente al problema del enterramiento de los residuos radiactivos de alta actividad y de las sustancias radiactivas que proceden del desmantelamiento del arsenal nuclear. Aunque el almacenamiento de los residuos radiactivos plantea retos y exigencias distintos de los presentados por el de sustancias procedentes del desmantelamiento de las bombas nucleares, ambos pueden tener una solución común: su enterramiento bajo el suelo marino.

Los residuos de alta actividad —en forma de barras de combustible gastado, que yacen en piscinas de las centrales, o en lodos guardados en depósitos de fábricas de armamento nuclear— se han ido acumulando durante más de medio siglo sin que se haya descubierto ningún método para su confinamiento definitivo. En las centrales estadounidenses hay más de 30.000 toneladas de combustible consumido, cifra que se incrementa cada año en otras 2000 t. El emplazamiento que se está preparando en la montaña de Yucca, estado de Nevada, muy controvertido, no entrará en funcionamiento antes del año 2015, si es que la presión en contra de su instalación no gana la partida.

Más apremiante resulta buscarle un cementerio al plutonio y al uranio procedentes del desmantelamiento del armamento nuclear. Hay que evitar que ese material pudiera caer en manos terroristas. Estados Unidos y Rusia tienen, cada uno, más de 100 t de plutonio adecuado para fabricar bombas nucleares; súmese a ello 50 t de plutonio excedente y cientos de toneladas de uranio altamente enriquecido, procedente del desmantelamiento del armamento nuclear, en cada bando. El temor de que llegue a terroristas o "estados marginales" está más que justificado: con una tonelada de plutonio pueden fabricarse cientos de cabezas nucleares; el número exacto depende del tamaño de la bomba y de la habilidad del ingeniero de armamento.

La Administración Clinton ha aprobado dos estrategias distintas para librar a la nación de esta peligrosa herencia. Ambas abren importantes incógnitas económicas, técnicas y políticas. En un método, se propugna la mezcla de plutonio excedente de las ojivas con residuos radiactivos y su posterior fusión para formar un vidrio especial (un proceso llamado vitrificación) o, quizá, cerámica para su posterior enterramiento en el sitio que se escoja. El vidrio o la cerámica inmovilizarían los isótopos radiactivos (para impedir su difusión hacia el entorno) y harían muy difícil la recuperación deliberada del plutonio. Pero la matriz vitrificada no protege contra la radiación; los residuos vitrificados seguirían siendo peligrosos antes de su almacenamiento. Para ahondar en esa línea, se está construyendo una nueva fábrica de vitrificación en Aiken, Carolina del Sur. En la hipótesis de que funcione de acuerdo con su capacidad proyectada, la fábrica produciría al día un cilindro de

CHARLES D. HOLLISTER y STEVEN NADIS vienen defendiendo desde hace años la posibilidad de perforar el fondo del mar para almacenar los residuos nucleares. Hollister, vicepresidente del Instituto Oceanográfico de Woods Hole, ha dedicado los últimos treinta años al estudio de los sedimentos de los mares de aguas profundas. Nadis ha investigado en energía nuclear, carrera de armamentos y fuentes renovables de energía.

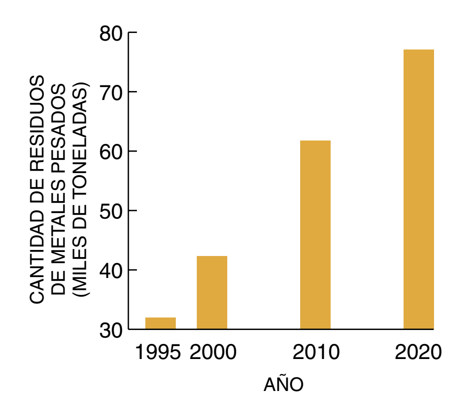
1. TUBOS DE ACERO que se tienden desde un barco que trabaja en la superficie. Podrían servir para perforar los lodos del suelo oceánico y abrir pozos donde se enterraran de forma permanente bidones de residuos nucleares. Una vez colocados, se bombearía, hacia el pozo, lodo para sellar el residuo nuclear en el seno arcilloso del subsuelo marino, dejando así eficazmente aislados los residuos radiactivos.



vidrio que contendría unos 20 kilos de plutonio. Se cifra en 1,4 millones de dólares el coste de cada cilindro. Y quedará todavía, desembolsado ese dinero, que almacenar los productos radiactivos salidos de esa fábrica de vanguardia.

De acuerdo con la segunda estrategia, habría que mezclar el plutonio recuperado con óxido de uranio para crear un combustible de "óxidos mixtos" utilizable en las centrales nucleares. Sin embargo, la mayoría de las centrales norteamericanas deberían realizar grandes ajustes para poder operar con esa mezcla. Esta solución alternativa que consiste en quemar combustibles de óxidos mixtos en centrales, aunque viable en su ejecución técnica, tiene muchos detractores. De entrada, acabaría con la necesaria separación entre los programas civiles y los militares; exigiría, además, medidas de extrema seguridad para evitar robos de material apto para fabricar bombas nucleares. Y, por fin, los reactores que quemaran óxidos mixtos producirían otros residuos nucleares. Ninguna de las dos estrategias para eliminar el material procedente del desmantelamiento del armamento nuclear resulta satisfactoria del todo.

Durante los últimos 15 años, los operadores de las centrales nucleares de los Estados Unidos han venido pagando al Departamento de Energía por adelantado una cuota para el almacenamiento de los residuos, cuando llegue. Todavía no hay un cementerio preparado. Pero la justicia obliga al DOE a que cumpla sus obligaciones contractuales y que comience a aceptar las barras de combustible gastado que le entreguen las centrales nucleares desde este año. No está claro qué hará el DOE con esos residuos. El Senado de los Estados Unidos presta respaldo a la construcción de un cementerio temporal en Nevada, cerca del emplazamiento de la montaña de Yucca, pero el presidente Bill Clinton se opone a esta medida provisional. En cualquier caso el apremio y la presión en demanda de actuaciones facilitan la improvisación y el juicio poco mesurado. En nuestra opinión, lo cauto sería no tomar medidas drásticas por ahora, limitarse a guardar el combustible retenido en las piscinas en almacenamientos en seco adecuados y procurar estabilizar las fugas de los depósitos de residuos de alta actividad en las fábricas de armamento nuclear. Mientras tanto,



científicos e ingenieros deberían investigar en profundidad soluciones razonables para el almacenamiento definitivo.

Aunque algunos visionarios hablan del día en que los residuos nucleares puedan lanzarse al espacio y desde él fundirse en el sol, la mayoría de quienes han estudiado el problema coinciden en que la forma segura y económica de almacenar los residuos es su enterramiento definitivo en profundidades geológicas. Llama la atención que la búsqueda de esos cementerios se haya limitado de manera casi única a los continentes, a pesar de que las formaciones geológicas que yacen bajo los océanos, que constituyen el 70 % de la superficie del planeta, ofrecen quizá mayores posibilidades. El enterramiento de residuos nucleares —procedentes de armas o de centrales— en el subsuelo oceánico no debe confundirse con su alojamiento en las fosas marinas, situadas en la unión de dos placas tectónicas; esta segunda propuesta encierra un grave riesgo, pues concentraría bidones de residuos en uno de los lugares geológicamente más inestables de la Tierra, sin poder anticiparse dónde acabaría ese material.

Su enterramiento en el subsuelo oceánico utilizaría, por contra, uno de los lugares más estables y predecibles del mundo; residuos radiactivos y materiales procedentes de las cabezas nucleares se implantarían "quirúrgicamente" en el centro de las placas tectónicas oceánicas. La selección de los emplazamientos lejos de los bordes de placas minimizaría la probabilidad de accidentes de origen volcánico o sísmico. La investigación ha identificado amplias zonas del Atlántico y del Pacífico que han permanecido geológicamente estables durante decenas de millones de años. Aún más, el manto arcilloso que cubriría el material radiactivo encierra propiedades favorables: escasa permeabilidad al agua, alta capacidad de adsorción de estos peligrosos elementos y una plasticidad natural que permite que el lodo selle cualquier grieta o rotura que pueda producirse en los bidones. La forma concreta en que se hallen los residuos (por ejemplo, si están o no vitrificados) no afecta a la viabilidad de esta solución. Ninguna formación geológica continental podría ofrecer tantas ventajas.



2. EL COMBUSTIBLE CONSUMIDO EN LOS REACTORES norteamericanos se duplicará de aquí al año 2020, aun cuando no se construyan más centrales (*gráfica*). Al no haber medio de confinamiento perdurable, el combustible nuclear se almacena de forma transitoria en las propias centrales, en piscinas refrigeradoras (*arriba*).

Importa resaltar que los residuos no quedarían en el suelo oceánico, sino en el subsuelo, en los sedimentos subyacentes. Las técnicas de perforación al uso permiten enterrar bidones de residuos nucleares a cientos de metros bajo el lecho del océano profundo (distante éste de la superficie del mar unos cinco kilómetros). Rutinaria es también la fase siguiente, de relleno para sellar y retacar las perforaciones. Hablamos de procedimientos que la industria petroquímica viene empleando desde hace decenios en la exploración de plataformas continentales y, más recientemente, por el Programa de Sondeos Oceánicos ("Ocean Drilling Program") en la determinación de buzamientos en profundidad.

Estamos pensando en un grupo experto en sondeos que perforase lodos y arcillas abisales, de emplazamientos escogidos, abriendo pozos cilíndricos de decenas o cientos de metros de profundidad; para permitir la facilidad de la maniobra distarían entre sí cientos de metros. Los bidones de plutonio u otros residuos radiactivos se introducirían uno a uno mediante cables en los sondeos; se colocarían verticales, separados por más de 20 metros de lodo, que podría bombearse en el pozo tras la instalación de cada bidón.

Lo mismo que en el almacenamiento de la montaña de Yucca, los bidones de residuos durarían unos miles de años, no más. Pero en el subsuelo oceánico, el lodo arcilloso, adherido tenazmente al plutonio y otros elementos radiactivos, impediría que estos contaminantes llegaran hasta el agua. Los experimentos realizados en el seno de un programa de investigación internacional llegaron a la conclusión de que el plutonio (y otros elementos transuránicos) enterrados en arcillas no migrarían más allá de pocos metros alrededor de un bidón agrietado, pasados incluso 100.000 años. Falta todavía por determinar con exactitud las tasas de migración del uranio y de otros elementos de los residuos radiactivos. Pese a ello, el enterramiento a decenas o ciento y pico metros por debajo del suelo marino supondría ganar tiempo suficiente para que se degradara la radiactividad de los residuos o se disipara en niveles muy inferiores a los que encontramos de manera natural en el agua del mar.

Al Grupo de Trabajo sobre el Fondo Marino, hoy disuelto, pertenecían 200 investigadores procedentes de 10 países. El programa, aunque dirigido por los Estados Unidos, estaba sufragado por la Oficina de Energía Nuclear de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo. El proyecto duró de 1976 a 1986 y en él se invirtieron 120 millones de dólares. La semilla del programa se había sembrado en el trabajo realizado por el Laboratorio Nacional de Sandia a sugerencia de uno de los autores (Hollister), quien concibió la idea del cementerio en el subsuelo marino en 1973.

En el curso del desarrollo del programa, se extrajeron testigos del fondo marino y se realizaron observaciones provisionales de una media docena de emplazamientos del Atlántico y del Pacífico. Los sedimentos recogidos mostraron una historia ininterrumpida de quietud geológica a lo largo de los últimos 50 o 100 millones de años. No hay motivos para pensar que tales puntos fueran una rareza. Antes bien, miles de testigos procedentes de otros puntos centrales de las placas, cuyo estudio se abordó en el marco del Programa de Sondeo Oceánico, revelan que los sedimentos en cuestión eran característicos de las arcillas abisales que cubren el 20 por ciento de la Tierra. Tenemos, pues, un dato indiscutible: aunque se objete el enterramiento de residuos en el subsuelo marino, no podrá aducirse falta de espacio.

El Grupo de Trabajo sobre el Fondo Marino llegó a la conclusión de que, pese haber información suficiente para avalar la viabilidad técnica de esa opción, "debe investigarse más antes de proceder al almacenamiento de residuos de alta actividad o combustible gastado". Pero nunca se realizaron los estudios adicionales requeridos. Estados Unidos, que sufragaba buena parte del trabajo, cortó la subvención en 1986, para que la nación concentrara sus esfuerzos en cementerios de tierra firme. Un año más tarde el gobierno federal decidió ceñirse al emplazamiento de la montaña de Yucca, una opción alicorta si tenemos en cuenta las dudas que existen sobre la posibilidad de que entre alguna vez en funcionamiento. Y aun cuando Yucca abriera, no podría almacenar todos los residuos de alta actividad, de origen militar y civil, que se hayan producido hasta el día de su inauguración. La industria nuclear genera

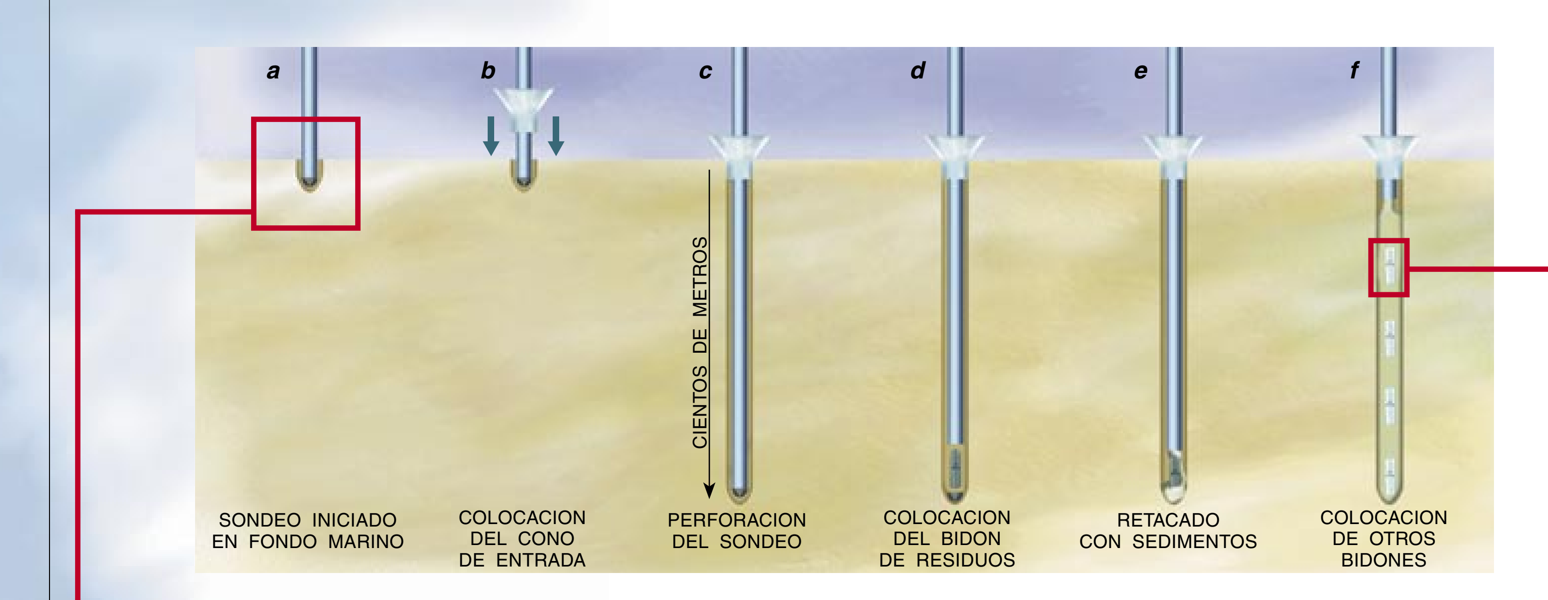


3. EMBARCACION DE SONDEO de suelos marinos profundos. Este tipo de embarcaciones podrían perforar el lecho, introducir en el subsuelo bidones de residuos nucleares y sellar los pozos con lodos.

ZONA DEL POLO NORTE

ZONA DEL POLO SUR

4. NO TODAS LAS PROVINCIAS MARINAS sirven para convertirse en cementerios de residuos radiactivos. En su búsqueda de zonas adecuadas, los científicos posiblemente eliminarían suelos de profundidades inferiores a los cuatro kilómetros (*azul claro*), que coinciden con los centros de expansión de las placas tectónicas y a menudo están recubiertos de sedimentos inadecuados. Prescindirían también de regiones con actividad tectónica: zonas de contacto de las placas tectónicas (*rojo*) o volcánicas. Se desecharían las zonas polares (en latitudes superiores a los 60 grados), cuyos sedimentos contienen a menudo fragmentos de roca arrastrada hacia su interior por los iceberg. Mas, después de descartar esas y otras zonas extensas (plataformas continentales, ricas en petróleo o gas), quedarían todavía vastísimas extensiones de fondo marino con grandes posibilidades para enterrar los residuos nucleares (*azul oscuro*).



cada año, al menos, 2000 toneladas de residuos de alta actividad.

En algún momento los políticos tendrán que enfrentarse con la realidad y buscar opciones alternativas. Así lo recogía un informe de 1990 elaborado por la Academia Nacional de Ciencias, donde abogaba por buscar alternativas a los cementerios geológicos profundos, incluido el almacenamiento en el subsuelo oceánico, recomendación que mantiene toda su validez.

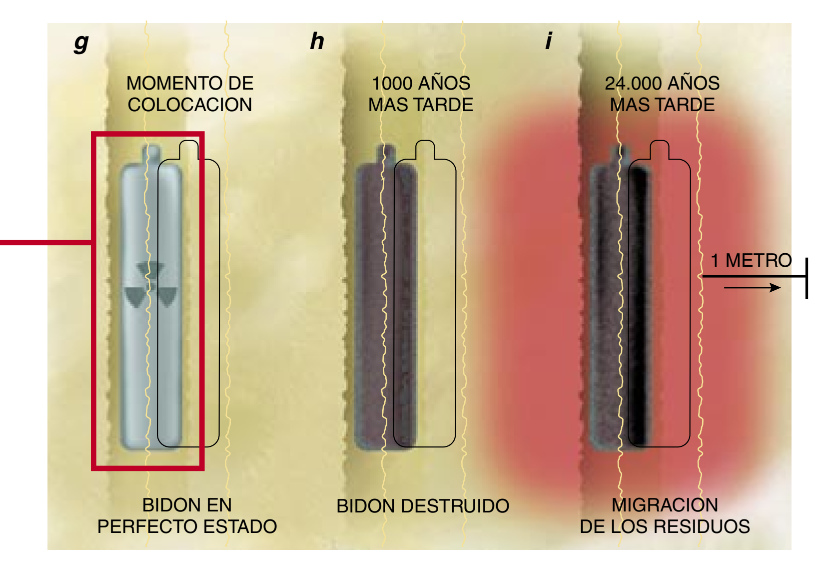
Para nuestra fortuna, los experimentos que habrían de respaldar la viabilidad y la seguridad de ese tipo de enterramiento están ya pergeñados. En algunos casos se cuenta incluso con los prototipos adecuados. Falta por comprobar si el plutonio y otros elementos radiactivos se mueven en la arcilla del suelo marino a las mismas velocidades que en los experimentos de laboratorio. Hay que averiguar también si el calor desprendido por las barras de combustible (originado por la rápida desintegración de los productos de la fisión nuclear) afectará a las arcillas del entorno.

Habrá que conocer de antemano hasta qué punto se resentiría la ecología del fondo marino y de las aguas que lo cubren. Por lo que sabemos, sólo hay formas de vida pluricelulares y móviles a un metro por encima de los lodos abisales. A menos de un metro no parece que exista organismo capaz de transportar sustancias radiactivas hacia arriba. Pero es justo el deseo de conocer con exactitud las consecuencias que se derivarían si las sustancias radiactivas se difundieran por sí solas en el lecho oceánico. Saber, por ejemplo, con qué rapidez exactamente los portadores de radiactividad más o menos solubles (isótopos de cesio y tecnecio) se disolverían hasta alcanzar los niveles de fondo existentes en las aguas marinas. Y predecir el comportamiento del plutonio, un elemento insoluble en comparación.

No hay pruebas de que existan corrientes de fuerza suficientes para superar la gravedad y elevar el plutonio retenido en las arcillas hasta la superficie del mar. Lo más probable es que éste se mantuviera en el suelo oceánico, salvo que lo acarreara a la superficie algún organismo que se alimentara en el fondo marino. Esta posibilidad y cualquier otra por la que los materiales radiactivos pasaran de los sedimentos a las aguas de superficie demandan una investigación rigurosa. También debe estudiarse hasta su exhaustividad el transporte marítimo de los residuos radiactivos. Es necesario contar con métodos de recuperación de la carga perdida por hundimiento del buque o por pérdida accidental de parte del cargamento.

A los ingenieros correspondería proyectar los bidones de residuos de una forma que permitiera su pronta recuperación del fondo del océano, lo mismo en el caso de caída fortuita que en el de su enterramiento definitivo si fuera necesario. Aunque el almacenamiento en el subsuelo marino se propone aportar una solución definitiva, podría requerirse la recuperación del plutonio en un momento del futuro. Para ello se emplearían las mismas herramientas de sondeo que las utilizadas para su colocación. Si se lleva un registro del emplazamiento de los bidones, quienes tuvieran que extraerlos luego no hallarían dificultad en localizarlos, guiados por los aparatos de navegación. Ninguna nación a extramuros del club nuclear posee la técnica necesaria para trabajar en aguas profundas y realizar estas tareas. En cualquier caso, sería casi imposible un robo clandestino de plutonio y otros residuos nucleares enterrados en el subsuelo por una partida terrorista o guerrillera.

Se estima que el coste global de un programa concertado para evaluar la posibilidad del almacenamiento en el subsuelo marino podría ascender a los 250 millones de dólares. Cierto, una suma importante tratándose de un programa de investigación oceanográfica. Pero resulta modesta si nos fijamos en los beneficios derivables. (Por mor de comparación se han invertido ya 2000 millones de dólares en la evaluación del cementerio de Yucca, y habrá que aportar otros mil o dos mil millones más para estudios complementarios y aprobación desde el punto de vista de la seguridad. Todavía no ha empezado la obra, salvo en lo referente a los túneles de exploración.) Pero no parece que haya ningún país dispuesto a invertir en las posibilidades del subsuelo oceánico, pese a que no ha recibido ninguna objeción técnica ni científica de peso. Un informe realizado por la norteamericana Academia Nacional de Ciencias en 1994 sobre las opciones para el almacenamiento del plutonio excedente del armamento nuclear entendía que el enterramiento en el subsuelo oceánico constituía “la principal alternativa a los cementerios geológicos profundos”; juzgaba además que su ejecución sería rápida y su coste, entre moderado y bajo. Pero la Academia no se atrevió a



5. EL ENTERRAMIENTO NUCLEAR bajo el fondo marino comporta una secuencia de tareas. Después de tender hasta el lecho un tubo largo y segmentado de perforación de varios kilómetros (*a*), se colocaría, desde el buque, un "cono de entrada" alrededor del tubo, que caería hasta el fondo (*b*). El cono podría guiar a otro tubo de perforación posteriormente si hubiera necesidad de ello. Girando y haciendo avanzar el tubo (al que se adapta un trépano), se adentraría éste en el subsuelo (*c*). Se retiraría el trépano y el equipo bajaría un bidón de residuos por el interior del tubo sirviéndose de cable (*d*). Luego de retacar esa parte del sondeo con lodo bombeado por el interior del tubo (*e*) se irían bajando otros bidones, colocados sobre el anterior (*f*). El bidón superior quedaría algunas decenas de metros bajo el fondo marino (*g*), por lo menos. Transcurridos unos mil años, el bidón, corroído, dejaría el residuo nuclear expuesto a los lodos (*h*). En los siguientes 24.000 años (vida media del plutonio 239), el plutonio y los restantes elementos transuránicos no avanzarían ni un metro en su salida hacia el exterior (*i*).

recomendarlo por el rechazo popular que se presumía y el posible conflicto con leyes internacionales.

No es grano de anís lograr convencer al público de las virtudes del enterramiento en el subsuelo marino. Pero acontece lo mismo con el proyecto de la montaña de Yucca, al que se oponen parte del gobierno regional y la población. El almacenamiento en el subsuelo marino podría quizá sostenerse mejor ante la ciudadanía que los cementerios nucleares en los continentes; nadie los quiere al lado de su casa.

En cualquier caso, el almacenamiento en el subsuelo marino levantará una estruendosa oposición en cuanto pase de posibilidad remota a opción real. Han aparecido ya las primeras críticas, pese a haberse detenido la investigación desde hace más de diez años. En 1997 se presentó ante el Parlamento norteamericano una proposición de ley que, de aprobarse, prohibiría el almacenamiento de combustible gastado o residuos radiactivos de alta actividad en el subsuelo marino e impediría la asignación de fondos a cualquier actividad relacionada con el citado almacenamiento, investigación incluida. Con dicha moción se pretende algo que es parcialmente razonable: el almacenamiento en el subsuelo oceánico será ilegal hasta que puedan solucionarse las cuestiones de seguridad y medio ambiente. Pero carece de sentido prohibir una posibilidad prometedora para el confinamiento del plutonio procedente del armamento nuclear y los residuos nucleares de alta actividad.

El almacenamiento en el subsuelo oceánico ha de hacer frente a importantes dificultades de ámbito internacional. En 1996, en una reunión patrocinada por la Organización Marítima Internacional, la Convención de Londres sobre Protección de los Océanos prohibió el enterramiento de material nuclear en el subsuelo marino. Esta resolución no está ratificada todavía por las naciones asistentes, y su resultado puede tardar varios años en conocerse. Pero al margen de lo que se vote, creemos que es totalmente equivocado declarar exento el océano.

Aun cuando las naciones involucradas respaldaran la prohibición, se permitiría que el almacenamiento en el subsuelo oceánico se reconsiderara a los 25 años, intervalo suficiente para llevar a cabo una evaluación adecuada de este método de almacenamiento. La moratoria de 25 años podría aprovecharse para solucionar los flecos científicos y de ingeniería pendientes, así como para valorar los costes de semejante opción, uno de sus principales puntos obscuros. En nuestra opinión más optimista, la infraestructura legal establecida en la convención de Londres, podría acabar por respaldar un programa internacional sobre el almacenamiento en el subsuelo marino.

En paralelo debería fomentarse la formación del público y abrir un debate. Corren tiempos en que el mundo ecologista se opone a cualquier acción dirigida a resolver el problema de los residuos nucleares. En particular repudian cualquier solución que pase por los océanos. Ahora bien, no es serio, porque un grupo se oponga a su mero planteamiento, abandonar la posibilidad de enterrar los residuos nucleares en formaciones suboceánicas estables, que exceden en varios órdenes de magnitud la superficie disponible para cementerios geológicos profundos. La prudencia dicta sentar sobre bases científicas una política de residuos nucleares, cuya incidencia en el entorno puede durar cientos de miles de años.

Dejando de lado el sueño de un milagro de la técnica que nos permitiera convertir los elementos radiactivos en elementos estables o que se los pudiera enviar de forma segura y económica al Sol, la sociedad debe buscar un lugar en el planeta para almacenar los residuos nucleares que genera y que permanecerán activos durante décadas. No deben concentrarse todos los esfuerzos en un solo emplazamiento, llámese Yucca o como se quiera. Ampliar la visión y explorar otras posibilidades es obligación que tenemos para con las generaciones futuras; y entre esas opciones está el confinamiento en el subsuelo oceánico, con su manto protector de lodo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SUBSEABED DISPOSAL OF NUCLEAR WASTES, C. D. Hollister, D. R. Anderson y G. R. Heath en *Science*, vol. 213, páginas 1321-1326; 18 de septiembre, 1981.

MANAGEMENT AND DISPOSITION OF EXCESS WEAPONS PLUTONIUM. National Research Council. National Academy Press, 1994.

THE SUB-SEABED SOLUTION. Steven Nadis en *Atlantic Monthly*, páginas 28-39; octubre 1996.

RADIOACTIVE WASTE: THE SIZE OF THE PROBLEM, John F. Ahearne en *Physics Today*, vol. 50, n.º 6, páginas 24-29: junio 1997.

PERFILES

W. Wayt Gibbs

CLAUDE LÉVI-STRAUSS: De los primitivos al nuevo orden mundial

El caos reina en el Barrio Latino de París, donde tiene su despacho Claude Lévi-Strauss. Por entre un laberinto de callejuelas, henchidas de institutos, librerías y cafés, corren motos y coches minúsculos sorteando manadas de estudiantes urgidos por no se sabe qué prisa, como si temieran llegar tarde, igual que yo, a una cita inaplazable.

Dentro del Laboratorio de Antropología Social, el sentido del orden se refleja en la geometría de las paredes. Conforme subo las escaleras del dúplex, cada uno de los escalones no sólo parece transportar hacia arriba en el espacio, sino también hacia atrás en el tiempo. La puerta del despacho da, según todas las apariencias, al siglo XIX. Aquí, en este ático, amueblado con estanterías empotradas y entre rarezas exóticas guardadas en campanas de cristal, tras un escritorio clásico, tiene su guarida Lévi-Strauss. Cuando me disculpo por llegar tarde, hace un mohín de sorpresa, como si el tiempo le pareciera irrelevante. Se asoma a la ventana que da al enjambre de archivadores imponentes que abarrotan el laboratorio del piso inferior. Una leyenda preside desde la pared opuesta: *Pour la Patrie, les Sciences et la Gloire*.

Una divisa pertinente. Después de todo, este hombre trastocó la opinión mundial sobre las sociedades primitivas no con su trabajo en alguna isla remota del Pacífico, sino —en gran medida— desde la mesa de su despacho de París. El es quien buscó para la antropología cultural un método formal y, rigor científico, para sus aspiraciones. Quien sin pretenderlo inició una moda intelectual que arrastró tras de sí las humanidades.

No es pequeña la gloria que Lévi-Strauss ha acumulado a lo largo de sus 89 años: recibió la Legión de Honor, pertenece a la Academia Francesa y a la Academia Nacional de los Estados Unidos, es doctor *honoris causa* por 11 universidades, incluidas las de Oxford, Yale y Columbia, y ocupa una cátedra creada para él en el prestigioso Collège de France. Pero su timbre de gloria debiera asociarse aquí a su talla intelectual.

Lévi-Strauss sostiene que nació para el análisis estructural, la técnica que considera la herramienta idónea para descubrir las constantes fundamentales de la naturaleza humana ocultas tras los vaivenes de los mitos y los rituales. En eso, dice, se divierte. No había recibido todavía su primera instrucción y ya se jactaba de saber leer porque había descubierto que la sílaba "bou" se encontraba tanto en el rótulo del carnicero (*boucher*) como en el del panadero (*boulanger*). Más tarde, cierto verano, se fue de excursión bordeando las mesetas arcillosas del macizo de Cévennes. "Me atraía observar el contacto entre dos estratos geológicos y seguir su curso a pesar de los obstáculos."

Los estudios de leyes y filosofía no consiguieron sino aburrir al inquieto Lévi-Strauss. Entró en la política por diversión y dirigió dos células de las juventudes socialistas. No fue ningún alumno modelo. Mas, no obstante la grave afección gastrointestinal que contrajo a causa de una ampolla de narcótico que se tomó ("para ponerse a tono") antes de su examen final oral, acabó el tercero de su clase. "Me presenté ante el tribunal con un aspecto de cadáver", recordaba en una entrevista en 1988, "sin haber sido capaz de preparar nada, e improvisé una conferencia que consideraron brillante, en la que creo que no hablé más que de Spinoza." (La asignatura era psicología aplicada.)



En su elemento, Claude Lévi-Strauss considera "la mente en estado salvaje"

En 1935 Lévi-Strauss se hizo a la mar, recaló en Brasil y empezó a dar clases en la Universidad de São Paulo. Durante las vacaciones, se adentraba en el país para registrar observaciones etnográficas de las tribus de los caduveo y los bororo. Varios años más tarde, tras irse de la universidad, dirigió una segunda expedición, de un año de duración, para estudiar las sociedades de los nambikwara y de los tupi-kawahib.

La guerra puso fin a sus viajes. Pero ya antes de ser llamado a filas, vio que el trabajo de campo no era lo suyo. "Me gustaba muchísimo", dice, "pero el tiempo que lleva y la demora de los resultados podían conmigo."

Cuando Lévi-Strauss huyó a Nueva York escapando de los nazis (su abuelo era rabino) y comenzó a trabajar en

la Nueva Escuela para la Investigación Social se refugió en una antropología más teórica. "Lo prefiero porque ¡requiere menos contacto con otros seres humanos!", exclama mientras se iluminan sus ojos. Además, el trabajo teórico le ofrecía la atrayente oportunidad de poner orden en el caos.

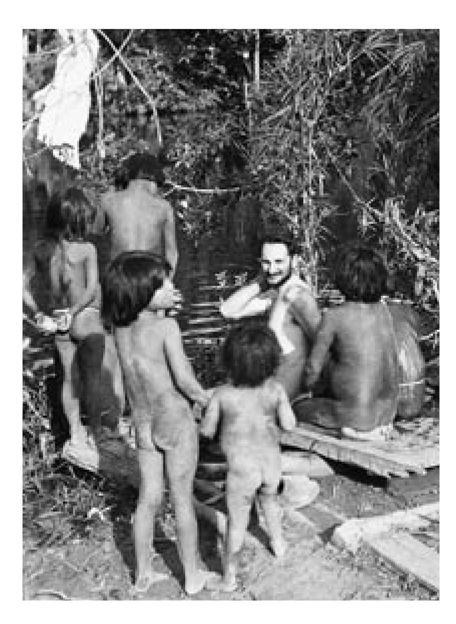
Todo un lío era por ejemplo el mundo de las normas que regulan el matrimonio y el parentesco en las sociedades humanas. A Lévi-Strauss se le presentó una solución cuando conoció a Roman Jakobson, un lingüista eslavo, exiliado en Nueva York. Jakobson, elaborando las teorías de Ferdinand de Saussure, había dado con una nueva manera de analizar los lenguajes.

Los principios eran bastante sencillos. Los sonidos del habla no tienen un significado inherente, como observara de Saussure: un mismo sonido aparece en palabras dispares. Los lenguajes funcionan porque tienen una estructura que prescribe ciertas construcciones y prohíbe otras. Y lo que es más señalado, argüía Jakobson, todos los lenguajes comparten determinadas estructuras, como es la oposición entre vocales y consonantes, que se desarrollaron de manera independiente sin que caigamos en la cuenta. Descubrir la veta común, según este razonamiento, era sacar a la luz los entresijos de la mente humana.

El hallazgo de Lévi-Strauss fue aplicar la misma clase de análisis estructural a los sistemas de parentesco de sociedades primitivas. En un ambicioso estudio de cuatro años, se aplicó a entender cómo afectaban las reglas de matrimonio de cada tribu a la manera en que se intercambiaban las mujeres y se formaban alianzas. Desde esta perspectiva, afirmaba, se obtiene un conjunto simple de oposiciones (entre los hermanos y las relaciones matrimoniales, por ejemplo) que crea una estructura común, un "lenguaje" del parentesco. Las costumbres de matrimonio y parentesco de cada sociedad eran expresiones diferentes; frases, por decirlo así, de ese lenguaje.

Excitado por las posibilidades que percibía en este nuevo método, Lévi-Strauss intentó aplicarlo al totemismo, la práctica de asociar personas a los animales o los espíritus. De nuevo puso de manifiesto patrones provocativos en lo que antes parecía una confusión sin sentido de creencias irracionales. Entusiasmado por el éxito, comenzó su obra maestra: un análisis estructural de 813 mitos de los indios americanos, junto con más de 1000 variantes de ellos, que dio lugar a los cuatro voluminosos tomos de *Mithologiques* (La lógica del mito).

Desmenuzando cuidadosamente cada mito en sus unidades constitutivas, Lévi-Strauss buscó entonces oposiciones binarias y construyó modelos o dibujó diagramas para representar sus relaciones. Formuló transformaciones matemáticas que conectaban, sostenía, un mito o una sociedad con mitos de otras sociedades separadas por grandes distancias de tiempo y lugar. "Aunque los mitos parecen narraciones absurdas", concluía en *El hombre desnudo*, el cuarto tomo de su obra, "las interconexiones entre sus absurdos son gobernadas por una lógica oculta". Los indios del Nuevo Mundo no eran irracionales; simplemente aplicaban su razonamiento a temas diferentes.



Un hombre desnudo: Lévi-Strauss entre los nambikwara de Brasil en 1938

Aunque la mayoría de los antropólogos estarían de acuerdo hoy con esa conclusión se cuestiona la validez de los métodos de Lévi-Strauss. Muchos críticos le reprochan que pasó muy poco tiempo con las manos en la masa para apreciar siquiera el grado de obscuridad que caracteriza a las sociedades y sus mitos. Le reprochan que sus transformaciones pecan de demasiado ordenadas, y su escepticismo no hace sino acrecentarse al ver la velocidad a la que se adaptó el "estructuralismo" para analizar cualquier cosa, desde las novelas hasta la serie *Star Trek*, pasando por el mundo circense.

Lévi-Strauss levanta sus manos al cielo cuando se le recuerda. "Este pretendido estructuralismo [en la crítica literaria] no es más que una excusa para la mediocridad", rezonga, una manera de insuflar aires de grandeza a trabajos poco interesantes. Lo que no obsta para que en su último libro *Mirar, escuchar, leer*, proponga una concepción estructuralista de la pintura, la música y la poesía.

Quizás esta contradicción tenga algún sentido. El antropólogo que antaño devino héroe para muchos jóvenes tiene ahora más ascendiente en el campo de la literatura que en el genuinamente antropológico. "En el Reino Unido se ha puesto de moda criticar y rechazar a los viejos maestros", se queja. "Esto ocurre periódicamente en la historia de cualquier disciplina científica. Pero la ciencia debería progresar incorporando las proposiciones antiguas en las nuevas y no rechazarlas."

No puedo retener por más tiempo la pregunta: pero, ¿es acaso la antropología cultural una ciencia? Después de todo, Lévi-Strauss, con su característica modestia, ha declarado con frecuencia que su materia tiene metas científicas pero métodos no científicos. Cierra su ojo izquierdo y escudriña alguna estructura oculta en el espacio teórico infinito que al parecer ocupa una esquina del techo. "Si comparase el estructuralismo con la ciencia dura", responde, "lo colocaría al nivel científico del Renacimiento. En las ciencias naturales el fisiólogo no critica al zoólogo por estudiar grupos de animales, [o] al biólogo molecular por estudiar las células. En las llamadas ciencias sociales", se lamenta, "¡todavía estamos discutiendo si lo correcto es ser fisiólogo, zoólogo o biólogo molecular!"

Para bien o para mal, ningún antropólogo quiere ya ser estructuralista. Lévi-Strauss no ha fundado escuela, ni ha formado a ningún sucesor. "Tomamos algunas de sus ideas y viajamos con ellas en otras direcciones", dice Barbara H. Tedlock, que fue editora de *American Anthropologist*. "Pero ninguna corriente domina en nuestro campo."

Los antropólogos están acostumbrados a que su objeto de estudio mengüe y desaparezca. Puesto ante la eventual extinción de su invento, Lévi-Strauss responde: "No me preocupa en absoluto. Era la manera de darles a todos esos datos algún sentido que me pareciera coherente, eso es todo. Lo hice porque me gustaba." *Pour la gloire*.

Arqueología romana

Vivir en Barcino

La ciudad romana de *Barcino* ha conservado numerosos testimonios que permiten asomarnos a la vida pública y privada de sus primeros habitantes. Aunque escasean las referencias literarias, las fuentes arqueológicas y epigráficas suplen con creces las lagunas de información.

La larga continuidad de las excavaciones urbanas ha posibilitado que conozcamos el tejido de aquel primer núcleo de la ciudad mediterránea subyacente al actual y que podamos restituir, por tanto, el escenario en el que deambularon los barceloneses de hace dos mil años. Un escenario al que se debe en parte la forma del casco antiguo y que presenta una notable continuidad de uso de los espacios públicos; así, por ejemplo, la plaza de San Jaime con sus edificios de gobierno regional y municipal se superpone parcialmente al foro de la ciudad romana. La catedral, en los aledaños, ocupa el mismo lugar de la primigenia basílica episcopal paleocristiana que estaba arropada por un complejo conjunto, lo mismo que sucede en otras capitales europeas.

El núcleo urbano estuvo ceñido desde sus orígenes por un circuito de murallas. Pero la vida de los barcinonenses no se limitaba a un espacio intramuros. Como toda ciudad romana, *Barcino* contó con su *ager* o territorio, que se extendería probablemente hasta *Fines* que cabe ubicar en Castellbisbal-Martorell y cuyo límite visible sería el arco del puente.

Fundada en época augustea, alrededor del año 10 a.C., persistió con las transformaciones y adaptaciones oportunas hasta bien entrado el alto Medievo. El registro arqueológico no permite remontar, por una parte, más allá del año 15 a.C., y por otro, la fecha de 9-8 a.C. de un miliario barcelonés nos faculta para situar hacia el año 1992 el bimilenario de la fundación de Barcelona.

Las zonas intramuros excavadas corrrespondan a áreas y edificios públicos de considerable extensión en algunos casos, como es el de las termas; en cambio, queda poco espacio para las casas privadas, que son siempre amplias *domus* y nunca bloques de pequeños apartamentos de alquiler *(insulae)*.

¿Dónde vivían los barceloneses? Su escasa población, de unos dos mil habitantes, estaba instalada en el territorio inmediato al recinto urbano. No se ha conservado ningún censo, pero sí el nombre de los que debie-





Puerta decumana de la muralla tardía de Barcino. Ahora se abre en la Plaza Nueva (izquierda). *Los restos del templo dedicado probablemente al culto imperial, edificado en época augustea en la parte más alta de la ciudad romana, se conservan en el Centro Excursionista de Cataluña* (derecha). *El templo presidía el foro*

ron elaborar uno de los primeros, si no el primero en época augustea: los duunviros quinquenales Gayo Celio y Quinto Salvio. El número de 2000 habitantes es proporcionado, a tenor de la densidad propia del mundo antiguo, aunque un tanto exiguo para las recias e imponentes obras de infraestructura realizadas para una ciudadanía tan escasa.



Necrópolis de los siglos I-III *que bordeaba una de las vías de acceso a la ciudad romana. Está enclavada en la actual Plaza de la Villa de Madrid. Destacan dentro de la tipología de las tumbas la abundancia de cupae, de forma semicilíndrica*



Gran inscripción hallada en la Plaza de San Miguel alusiva al colegio de los seviros augustales, libertos que asistían a los flamines (sacerdotes) en el culto imperial. Constituyó un estamento social muy activo y de gran importancia para la vida en la Barcelona romana. (Museo de Historia de la Ciudad.)

Los barceloneses de la época romana disfrutaron de una vida desahogada, con un interés del dinero entre el 5 y el 6 %, según nos atestiguan dos importantes inscripciones del siglo II d.C. *Barcino* se organizó desde sus orígenes alrededor del puerto del Llobregat (*Rubricatum flumen*), arteria vital de entrada y salida de productos. De allí partía el material de construcción barcelonés por excelencia, la piedra arenisca de las canteras de Montjuïc, o los vinos que se elaboraban en la zona, que era, además, rica en pesca; unos depósitos bajo la plaza del Rey y el elogio a la abundancia de ostras por parte del poeta Ausonio en el siglo IV constituyen sólidos testimonios al respecto. Otras fuentes de riqueza las constituían los cereales y las explotaciones mineras de la zona de Gavá, donde se extraía hierro y galena argentífera.

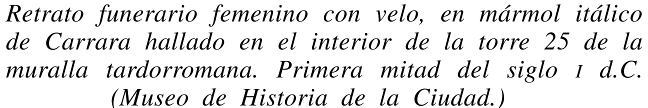
Estas favorables condiciones del territorio fueron, sin duda, tenidas en cuenta por Augusto cuando decidió fundar la colonia de *Barcino* en el llano litoral estable más próximo a la desembocadura del Llobregat; la comunicó también por vía terrestre, trazando el recorrido costero de la vía Augusta que entraba en la ciudad por la puerta que se abría en la plaza del Angel-calle Llibretería y salía por la del Call para continuar por el llano de la Boquería. La *Barcino* romana dispuso de todo el equipamiento digno de una ciudad del momento. Dos acueductos la abastecían con aguas traídas desde Collcerola y el río Besós.

El estatuto de la ciudad era el privilegiado de colonia, inmune además con la exención de ciertos impuestos. Un senado local (*ordo decurionum*) de unos cien miembros (*decuriones*) regía la ciudad junto con los magistrados municipales elegidos anualmente: los *duoviri*, según el modelo de los dos cónsules de Roma, y los *aediles*, que constituían el primer grado de la carrera municipal. Completaban el cuadro dirigente los sacerdotes encargados del mantenimiento del culto imperial (*flamines*), asistidos por un colegio de seis miembros (*seviri augustales*) que constituían un auténtico poder fáctico.

Todas las magistraturas, de carácter honorífico, habían de ser ejercidas por hombres *ingenui*, es decir nacidos libres y mayoritariamente en *Barcino*, según podemos deducir de su adscripción a la tribu *Galeria* correspondiente a la ciudad. Pero también se brindó a los forasteros el acceso a los cargos municipales, como por ejemplo el centurión retirado Lucio Cecilio Optato, que ejerció por tres veces el cargo de duunvir y fue también *flamen*. Los hombres que, nacidos esclavos, habían sido manumitidos podían promocionarse a través del sevirato augustal.

Las más de 300 inscripciones, conservadas principalmente en el Museo de Historia de la Ciudad y en el Museo de Arqueología de Cataluña,





Retrato funerario femenino con velo, en mármol itálico de Carrara hallado en el interior de la torre 25 de la muralla tardorromana. Primera mitad del siglo I d.C. (Museo de Historia de la Ciudad.)



Pinturas murales de una casa unifamiliar (domus) hallada en el patio del palacio arzobispal de Barcelona y conservadas en la actualidad en el Museo de Historia de la Ciudad

nos atestiguan toda la gama del escalafón social desde la más elevada compuesta por los senadores a la más baja, la de los esclavos, pasando por los caballeros, magistrados municipales, hombres libres y libertos. Entre los senadores cabe destacar a los dos *Minicii Natales*, padre e hijo, que se distinguieron por el amor hacia su ciudad, con la donación de las termas públicas y el generoso legado testamentario de Minicio junior, el vencedor el año 129 de la carrera de cuádrigas en la 227 edición de los Juegos Olímpicos.

Con todo, el estamento más activo desde la etapa fundacional de *Barcino* fue el constituido por los libertos, que detentaban un fuerte poder económico y llegaron a conformar un verdadero clan económico. Caso excepcional en los primeros años del siglo II d.C. fue el de Lucio Licinio Segundo, liberto del poderoso ministro de Trajano, Lucio Licinio Sura. Este antiguo esclavo fue el hombre más homenajeado de todo el Imperio romano con 24 pedestales conocidos levantados en el foro barcelonés con sus correspondientes estatuas broncíneas, hoy perdidas.

Constituye un hecho poco usual que una pequeña ciudad (*parvum oppidum*) como *Barcino* posea un *corpus* tan nutrido de inscripciones, debido en buena parte a su reutilización en la construcción de las murallas tardorromanas y a las constantes campañas de excavación.

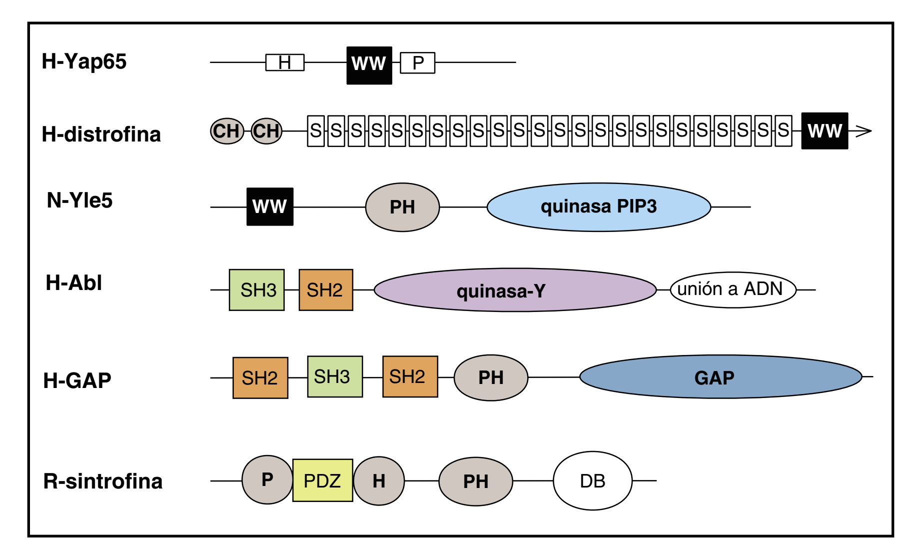
Conocemos los nombres de más de 400 de sus habitantes, principalmente de los siglos I y II. El nombre de familia (*nomen*) más habitual era el de *Iulius*, gentilicio imperial y, además, el del fundador de la ciudad, Augusto. Fue también corriente el de *Valerius*, como sucede en la vecina Galia Narbonense con la que *Barcino* mantuvo estrechos contactos. En cambio un nombre raro en el resto del Imperio, pero muy frecuente en la Barcelona romana, fue el de *Pedanius*, llevado por hombres libres y por un buen grupo de libertos; también abundan los gentilicios de raigambre itálica al constituir los colonos de este origen el primer núcleo poblacional. Respecto al nombre personal (*cognomen*), que era el único que tenían los esclavos al carecer de derechos y no estar incluidos en una familia (*gens*), eran normales los de tipo helénico entre los libertos. Para los hombres libres tenemos documentados *cognomina* tan latinos como *Natalis* o *Vitalis*, de los que derivan los modernos Nadal y Vidal.

En las ciudades romanas, las termas públicas constituían un punto obligado de encuentro y de relaciones sociales. El foro concentraba las actividades religiosas, oficiales, políticas, comerciales o lúdicas. De nuevo, las inscripciones nos atestiguan algunos oficios de carácter privado, como el

de nodriza, y la organización colegial de ciertos tipos de trabajo, como es el caso del *collegium fabrum* que reunía a los trabajadores de los materiales duros bajo la advocación de la diosa Minerva.

Con todo lo que nos es dado conocer de la Barcelona romana, podemos imaginar una vida diaria plácida y activa, con buenas instalaciones públicas y privadas para un núcleo urbano de reducidas dimensiones, dinámico y cómodo, de un singular carácter abierto, condiciones que perdurarían en el Bajo Imperio cuando el obispo barcelonés, Paciano, exhorta a sus feligreses con las siguientes palabras: "no os faltan lugares de reposo en medio de parques o a orillas del mar, ni vinos exquisitos, ni espléndidos banquetes, ni recreo para la vejez".

ISABEL RODÁ
Universidad Autónoma de Barcelona



Algunas proteínas modulares y los dominios que las constituyen

Proteínas modulares

Interacciones

El conocimiento molecular de muchos procesos biológicos se ha visto reforzado con el descubrimiento de nuevas proteínas y la identificación, durante los últimos años, de un número creciente de estructuras de biomoléculas.

Gracias a la secuenciación de genomas de diversos organismos se van clasificando muchas proteínas en familias y descubriendo otras nuevas. Sin ir más lejos, las proteínas modulares, cuya secuencia podemos dividir en dominios. Estos módulos estructurales aparecen en proteínas de funciones diversas. Se presume que esos dominios, o módulos, intervienen en procesos de comunicación intra o intercelular.

Para abordar el estudio estructural de las proteínas modulares se procede a su disección en dominios mediante técnicas de ingeniería genética. Se han determinado ya las estructuras de SH2, SH3, PH, PDZ y PTB, por poner algunos ejemplos. De la investigación acometida resulta manifiesto que, dentro de cada familia de dominios, se mantiene la estructura de los mismos, presenten o no secuencias divergentes.

En el estudio de dominios de proteínas importa también conocer las moléculas con las que interaccionan. En ese sentido, se descubrió que el dominio SH2 reconocía secuencias de proteínas con tirosinas fosforiladas, el SH3 prefería secuencias ricas en prolinas, el dominio PH unía derivados de fosfatidil-inositol, etcétera.

En el Departamento de Resonancia Magnética Nuclear del Laboratorio Europeo de Biología Molecular en Heidelberg hemos venido trabajando con el dominio WW (el nombre proviene de dos triptófanos, W, que aparecen bien conservados en su secuencia). En el marco de esa investigación hemos resuelto, por resonancia magnética homo y heteronuclear multidimensional, la estructura del dominio presente en la proteína Yap65 ("Yes associated protein 65"). Esta se identificó al examinar las proteínas que interaccionaban con la oncoproteína quinasa Yes.

La clonación de Yap65 de tres especies distintas —pollo, ratón y humanos— condujo al descubrimiento del dominio WW. La secuencia de Yap65 ha persistido sin grandes alteraciones en los tres organismos. En el ratón, sin embargo, se observa una inserción de unos 40 aminoácidos en su parte central. Al analizar las bases de datos de proteínas, se comprobó que dicha región aparecía en otras secuencias de proteínas que, por lo demás, no guardaban ninguna homología.

Luego, se halló que el dominio WW de Yap65 reconocía, de una manera selectiva, las proteínas que contenían la secuencia -GTPPPPYTVG-. En nuestro laboratorio identificamos la estructura del complejo formado por el dominio WW (secuencia de humanos) y el péptido anterior. La estructura del dominio consiste en una lámina beta constituida por tres hebras dispuestas en un sentido antiparalelo. El dominio, mínimo, carece de puentes disulfuro para estabilizar su plegamiento.

El péptido adopta una estructura en hélice de poliprolina de tipo II y se sitúa en la cara cóncava de la lámina beta. Allí se localizan tres aminoácidos expuestos al disolvente y crean la superficie de contacto con el ligando: tirosina, leucina y el segundo triptófano.

Las interacciones entre las prolinas 4 y 5 del péptido con el triptófano y la tirosina del dominio, así como otras observadas entre la tirosina del péptido y la leucina expuesta, definen la estructura del complejo. Por otro lado, dos prolinas a ambos extremos de la secuencia del dominio presentan contactos con uno de los triptófanos, manteniendo los extremos N- y C- terminales muy próximos en el espacio. Este fenómeno, observado en todas las estructuras de dominios estudiados, podría haber facilitado el proceso general de inserción de los dominios en las proteínas huéspedes sin alterar su estructura global.

Para comprender la especificidad en el reconocimiento entre ambas partes del complejo, diseñamos mutantes en la proteína y en el péptido y analizamos sus interacciones. Estos estudios nos han permitido acotar la zona de unión mínima del péptido a la región PPPY y ponderar la importancia de los residuos del dominio a la hora de unirse al péptido. Es interesante resaltar que, pese a carecer de homología de secuencia o de estructura con el dominio SH3, ambos reconocen el mismo tipo de

```
YA65_AVE       MDPGQ.PQPQ QPPQ.AAQPP APQQAAPQPP GAGSGAPGGA AQPPGAGPPP
YA65_HUMANOS   MDPGQQPPPQ PAPQGQGQPP S.QPPQGQGP PSGPGQPAPA ATQAAPQAPP
YA65_RATONES   MEPAQQPPPQ PAPQ...... ........GP ..APPSVSPA GTPAAPPAPP

YA65_AVE       AGHQIVHVRG DSETDLEALF NAVMNPKGAN VPHTLPMRLR KLPDSFFKPP
YA65_HUMANOS   AGHQIVHVRG DSETDLEALF NAVMNPKTAN VPQTVPMRLR KLPDSFFKPP
YA65_RATONES   AGHQVVHVRG DSETDLEALF NAVMNPKTAN VPQTVPMRLR KLPDSFFKPP

YA65_AVE       EPKAHSRQAS TDAGTAGALT PQHVRAHSSP ASLQLGAVSP GTLTPSGVVT
YA65_HUMANOS   EPKSHSRQAS TDAGTAGALT PQHVRAHSSP ASLQLGAVSP GTLTPTGVVS
YA65_RATONES   EPKSHSRQAS TDAGTAGALT PQHVRAHSSP ASLQLGAVSP GTLTASGVVS

YA65_AVE       GPGA.PSSQH LRQSSFEIPD DVPLPPGWEM AKTPSGQRYF LNHIDQTTTW
YA65_HUMANOS   GPAATPTAQH LRQSSFEIPD DVPLPAGWEM AKTSSGQRYF LNHIDQTTTW
YA65_RATONES   GPAAAPAAQH LRQSSFEIPD DVPLPAGWEM AKTSSGQRYF LNHNDQTTTW   WW1

YA65_AVE       QDPRKAMLSQ MNVTAPTSPP VQQNLMNSAS .......... ..........
YA65_HUMANOS   QDPRKAMLSQ MNVTAPTSPP VQQNMMNSAS .......... .........
YA65_RATONES   QDPRKAMLSQ LNVPAPASPA VPQTLMNSAS GPLPDGWEQA MTQDGEVYYI   WW2

YA65_AVE       .......... ........AM NQRISQSAPV KQPPPLAPQS PQGGVMGGSS
YA65_HUMANOS   .......... ........AM NQRISQSAPV KQPPPLAPQS PQGGVMGGSN
YA65_RATONES   NHKNKTTSWL DPRLDPRFAM NQRITQSAPV KQPPPLAPQS PQGGVLGGGS

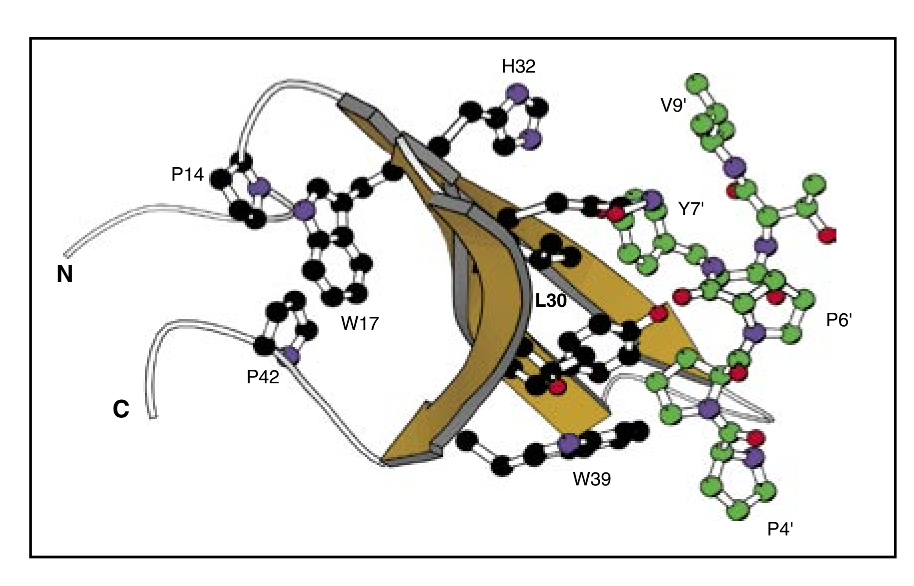
YA65_AVE       SNQQQQMRLQ QLQMEKERLR LKHQELLR.. ..QELALRSQ LPTMEQDGGS
YA65_HUMANOS   SNQQQQMRLQ QLQMEKERLR LKQQELLRQV RPQELALRSQ LPTLEQDGGT
YA65_RATONES   SNQQQQIQLQ QLQMEKERLR LKQQELFR.. ..QELALRSQ LPTLEQDGGT

YA65_AVE       QNPVSSPGMS QELRTMTTNS SDPFLNSGTY HSRDESTDSG LSMSSYSVPR
YA65_HUMANOS   QNPVSSPGMS QELRTMTTNS SDPFLNSGTY HSRDESTDSG LSMSSYSVPR
YA65_RATONES   PNAVSSPGMS QELRTMTTNS SDPFLNSGTY HSRDESTDSG LSMSSYSIPR

YA65_AVE       TPDDFLNSVD EMDTGDSISQ SNIPSHQNRF PDYLEAIPGT NVDLGTLEGD
YA65_HUMANOS   TPDDFLNSVD EMDTGDTINQ STLPSQQNRF PDYLEAIPGT NVDLGTLEGD
YA65_RATONES   TPDDFLNSVD EMDTGDTISQ STLPSQQSRF PDYLEALPGT NVDLGTLEGD

YA65_AVE       GMNIEGEELM PSLQEALSSD ILNDMESVLA ATKPDKESFL TWL
YA65_HUMANOS   GMNIEGEELM PSLQEALSSD ILNDMESVLA ATKLDKESFL TWL
YA65_RATONES   AMNIEGEELM PSLQEALSSE IL.DVESVLA ATKLDKESFL TWL
```

Alineamiento de las proteínas de la familia Yap65. Los aminoácidos conservados en las secuencias de los tres organismos están sombreados en gris. Las secuencias del dominio WW aparecen subrayadas



Esquema del complejo entre el dominio WW y el péptido GTPPPPYTVG en el que se destacan las cadenas laterales de los aminoácidos involucrados en la unión

ligando: secuencias de proteínas con hélice de poliprolina.

Hemos trabajado, asimismo, en la resolución de la estructura de otro complejo entre el dominio WW presente, esta vez, en una proteína involucrada en la regulación del desarrollo de las extremidades en mamíferos y su correspondiente ligando. La determinación de la estructura del segundo complejo habrá de ayudarnos a entender mejor los aspectos generales de la interacción dominio-ligando.

MARÍA J. MACÍAS
Laboratorio Europeo de Biología Molecular, Heidelberg

Espectroscopía láser

Aplicaciones alimentarias y ambientales

Entre las necesidades que con mayor apremio urge satisfacer en nuestra sociedad de consumo está la del análisis químico de contaminantes en muestras naturales. Hay razón para esa demanda: el alto grado de toxicidad de estas sustancias incluso a pequeñas concentraciones.

Pero el análisis de muestras naturales presenta problemas de difícil solución mediante las técnicas tradicionales, no sólo en lo concerniente a la sensibilidad —las sustancias de interés se encuentran en cantidades del orden del nanogramo o inferiores—, sino también en punto a selectividad, resolución, dificultad analítica, tediosa preparación de las muestras, etcétera.

En los laboratorios de la Unidad de Láseres y Haces Moleculares del Instituto Pluridisciplinar de la Universidad Complutense de Madrid, hemos puesto a punto una técnica de análisis ambiental práctica y versátil que salva en buena medida tales inconvenientes. Nuestro método consiste en la desorción por láser de la muestra y el análisis por ionización multifotónica resonante mediante un segundo láser, con posterior detección por espectrometría de masas por tiempo de vuelo de los iones generados. Se trata de una adaptación de la técnica LD+REMPI+TOF (“Laser Desorption + Resonant Enhanced Multi-photon Ionization + Time of Flight”). En exactitud y precisión, economía, versatilidad, rapidez, selectividad y sensibilidad aventaja de largo a las técnicas habituales de análisis ambiental.

El sistema experimental se compone de tres partes principales: láseres, sistema de vacío y equipos electrónicos. Se emplean dos láseres pulsados de alta energía; uno de ellos, el utilizado para la ionización, puede sintonizarse para elegir la longitud de onda adecuada para cada molécula de interés analítico. El sistema de alto vacío consta de dos cámaras: en la primera se realiza la desorción de la muestra a analizar sin fragmentar, la ionización y aceleración de los iones mediante unas placas conectadas a tres fuentes de alto voltaje. Cada ion adquiere una velocidad distinta en función de su masa. Luego, los iones entran en la segunda cámara de

PORTAMUESTRAS
LASER ND:YAG
V1
LASER COLORANTE
V2
V=0
V=0
V3
V=0
VALVULA DE GUILLOTINA
TOF (1 METRO)
DETECTOR

Vista esquemática del sistema experimental. Se muestra la interacción de los dos láseres con la muestra a analizar, así como otras partes internas descritas en el texto. En la fotografía se muestra una vista panorámica de la técnica

aproximadamente un metro de longitud, donde el campo eléctrico es cero. El procedimiento permite separar los iones en razón de su velocidad y, por tanto, según su masa. La detección se realiza por un sistema de platos microcanales situados al final de esta cámara. La señal obtenida, digitalizada en un osciloscopio acoplado a un ordenador, registra el espectro de tiempo de vuelo en el que cada pico corresponde a una masa.

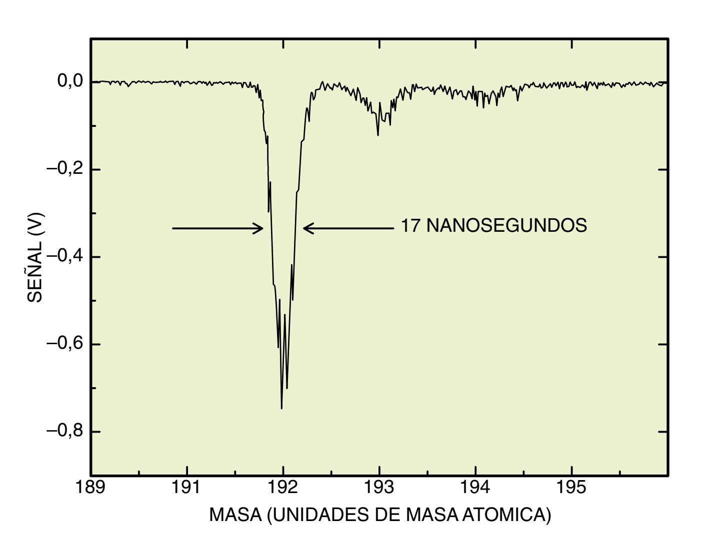
La principal innovación de nuestro sistema estriba en la realización de un análisis directo. A diferencia de lo que acontece en cromatografía, no requiere un tratamiento previo de preparación de la muestra ni hay que proceder a una separación. Así, al prescindir de una de las principales fuentes de error inherente a las técnicas que precisan este tipo de tratamiento, aumenta la exactitud del método. Sin manipulación previa ahorramos tiempo, costes y disolventes.

Por otra parte, hay compuestos química o térmicamente inestables que no admiten ningún tratamiento previo al análisis. En nuestro caso, la desorción se produce mediante un pulso láser de gran energía y en un tiempo muy corto (unos cuatro nanosegundos). Por ello conseguimos la desorción de moléculas lábiles minimizando su fragmentación.

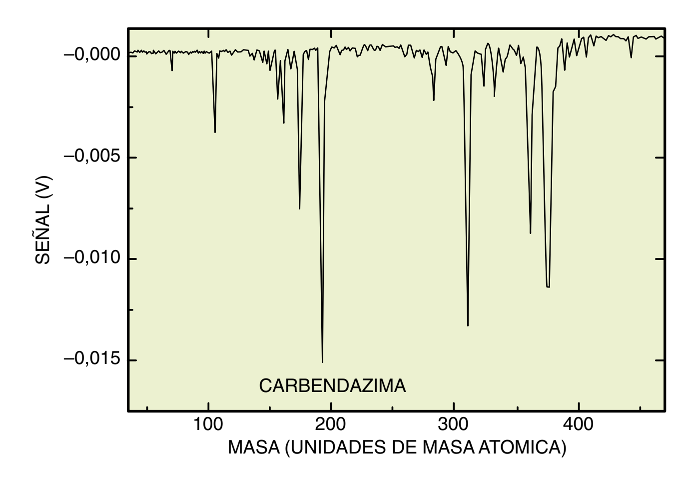
Nuestra técnica, muy versátil, analiza muestras sólidas y gaseosas. Puede, además, determinar de forma simultánea distintas sustancias de interés. Al combinar la técnica láser con espectrometría de masas se logra una gran selectividad y resolución, así como muy buena sensibilidad. El principal problema que presentan las técnicas tradicionales de espectrometría de masas es el de la ionización no selectiva; en ella sustancias diferentes con la misma masa dan una sola señal.

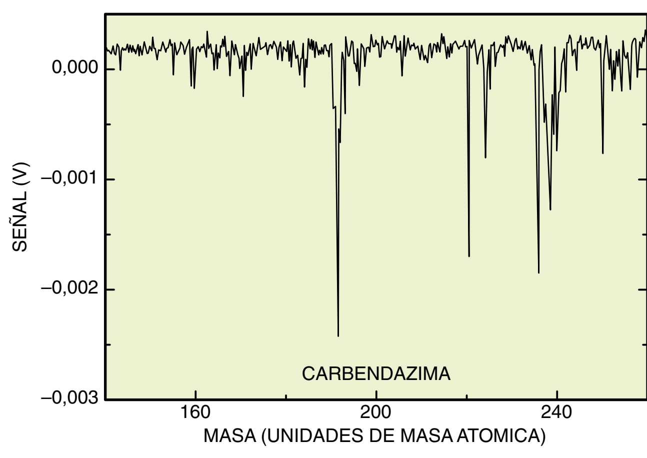
El láser sintonizable permite ionizar preferentemente la sustancia de interés, aun cuando esté en una muestra compleja. Cada molécula tiene unos niveles energéticos definidos y sólo es capaz de absorber fotones cuya energía coincida con la diferencia entre dos niveles (fenómeno de resonancia). La monocromaticidad del haz láser hace que se ionicen exclusivamente las moléculas cuyos niveles energéticos sean resonantes con la longitud de onda utilizada. Ello significa que la espectroscopía molecular añade selectividad a las técnicas de análisis por masas cuando en ellas se emplea un láser para la ionización.

Otro parámetro variable de los láseres es su energía por pulso. Con una energía moderada podemos ionizar la molécula; a energías mayores podemos producir la fragmentación y la ioniza-



Espectro de masas de la carbendazima con una resolución de R = 834 en un pico de 191 unidades de masa atómica





Resultados a partir de los cuales se han obtenido los límites de detección del sistema de los autores para el contenido relativo de carbendazima en muestras de pimiento y para la cantidad absoluta de producto en una muestra. El gráfico de la izquierda corresponde al espectro de masas de la carbendazima obtenido a partir de una muestra con 0,4 microgramos de carbendazima en 765 miligramos de pimiento (0,5 partes por millón de carbendazima). A partir de esta señal se puede calcular que el límite de detección de nuestra técnica es mejor que 0,04 ppm de carbendazima en pimiento. El gráfico de la derecha corresponde al espectro de masas de la carbendazima obtenido a partir de una muestra con 150 nanogramos de carbendazima en 150 miligramos de pimiento (1 partes por millón). Este resultado muestra la gran sensibilidad de nuestra técnica: teniendo en cuenta el diámetro del haz láser, dicha señal corresponde a una cantidad desorbida inferior a 1 ng de carbendazima

ción de los fragmentos. A partir del patrón de fragmentaciones podemos distinguir entre dos isómeros de igual masa.

La resolución —anchura del pico obtenido dividida por la masa del ion al que corresponde— es la magnitud que nos permite conocer la masa mayor que puede detectarse. En nuestro sistema hemos conseguido un valor de R = 834, es decir, un grado de resolución en que podrían distinguirse de manera inequívoca dos especies cuyas masas fuesen de ese orden; la gran mayoría de los compuestos de interés analítico tienen una masa menor.

El aumento de sensibilidad se debe a que la ionización por láser es mucho más eficaz que las técnicas habituales de ionización por impacto electrónico.

Entre las múltiples aplicaciones de esta técnica al análisis químico ambiental, en el Instituto Pluridisciplinar de Madrid prestamos atención preferente al estudio de plaguicidas empleados en los cultivos agrícolas del sur de España (carbendazima, 1-naftalenacetamida e imidacloprid) y al análisis de compuestos poliaromáticos (antraceno, tolueno, benceno, pireno y xileno) de muestras gaseosas.

Debido a su alta toxicidad y su presencia habitual en el entorno, los plaguicidas deben cuantificarse con gran precisión y a niveles muy bajos. La normativa europea sobre la calidad del agua potable establece un límite de 0,1 miligramos por litro para cada plaguicida por separado y de 0,5 miligramos por litro para el contenido total de los mismos. La legislación española ha adaptado las directivas europeas relativas a la fijación de los contenidos máximos de residuos de plaguicidas en determinados productos de origen vegetal; los nuevos límites fijados varían, dependiendo del tipo de pesticida y del cultivo sobre el que se emplean, entre 0,01 y 5 partes por millón.

La carbendazima es un fungicida común en cultivos de cereales, frutas y verduras. Se ha comprobado que, en los animales, produce esterilidad, malformaciones fetales y otros efectos nocivos. Además, la carbendazima sirve de indicador para el análisis de otros pesticidas como el benomil o el metil-tiofanato. Igual que el resto de los carbamatos es térmicamente inestable, por lo que no puede analizarse mediante cromatografía de gases.

Nos proponemos analizar también contaminantes atmosféricos, principalmente trazas de hidrocarburos poliaromáticos (antraceno, tolueno, benceno y pireno). Los hidrocarburos poliaromáticos son subproductos de la combustión incompleta de gasolinas y gasóleos en automóviles, calefacciones o centrales térmicas; proceden también de la evaporación de los tanques de almacenamiento de los derivados del petróleo. Su principal riesgo para la salud humana estriba en su carácter carcinógeno.

Desde un punto de vista ambiental, los hidrocarburos están involucrados en los procesos fotoquímicos troposféricos. Alteran el ciclo fotolítico del NO_2 y favoren la acumulación de ozono en las capas bajas de la atmósfera con la consiguiente generación de niebla fotoquímica (el “smog”) que cubre los núcleos urbanos de gran densidad de tráfico. Se hallan en las ciudades en concentraciones superiores al miligramo por metro cúbico de aire. La normativa europea impone un límite a las emisiones totales de hidrocarburos más óxidos de nitrógeno de 0,97 gramos por kilómetro para los vehículos automóviles, aunque se ha propuesto reducir dicho límite hasta 0,05 gramos por kilómetro.

Ahora bien, el análisis de contaminantes atmosféricos ha de hacer frente a la doble dificultad que supone el elevado número de compuestos de la muestra y el amplio rango de concentración de los mismos (desde menos de 1 parte por millón hasta un 20 %). Para el análisis individual de estos compuestos podemos recurrir a diversos métodos, de la quimioluminiscencia a la ionización por llama, pasando por la espectroscopía infrarroja. Sin embargo, se trata de métodos que, por lo común, necesitan procedimientos largos y tediosos y en ningún caso pueden considerarse una técnica

general de análisis de contaminantes atmosféricos.

El análisis por ionización multifotónica con láseres pulsados combinada con la espectrometría de masas por tiempo de vuelo permite, por contra, la determinación simultánea de gran cantidad de estos compuestos aromáticos y de contaminantes inorgánicos (NO_x, CO, CO_2, SO_2, etcétera) en el rango de las partes por millón, en muestras gaseosas procedentes del entorno urbano.

Gracias a la extraordinaria sensibilidad y resolución de este método experimental, basado en la espectroscopía láser resonante, podemos además abordar el análisis cuantitativo de sustancias y oligoelementos beneficiosos para la salud humana presentes en los alimentos en pequeñísimas concentraciones. Estos trabajos y desarrollo tecnológico han sido posibles gracias a la ayuda de la DGYCIT (proyecto PB95/391) y CAM (proyecto 06M/058/96).

B. BESCÓS, J. M. OREA,
C. MONTERO y A. GONZÁLEZ UREÑA
Unidad de Láseres
y Haces Moleculares,
Instituto Pluridisciplinar,
Universidad Complutense
de Madrid

Biología del desarrollo

Morfogénesis foliar

A la vista está, la evolución vegetal ha generado una espectacular diversidad de formas y tamaños de las hojas. Fenómeno tan palmario fue advertido por los naturalistas de todos los tiempos, que supieron reconocer la idiosincrasia de la forma de las hojas, su carácter específico de especie. Constituía ya un criterio taxonómico importante cuando lo retomó, mediado el siglo XVIII, Carolus Linnaeus, artífice de la sistemática moderna. Pero ese reconocimiento universal contrasta con la escasa información disponible, casi 250 años después, sobre la genética de la formación y el crecimiento de las hojas. Parece, sin embargo que la situación ha comenzado a cambiar.

A diferencia de las células animales, las vegetales poseen una protectora pared celular que impide su migración durante el desarrollo de la planta. Ante la contemplación de tal inmovilidad, han venido admitiendo los botánicos que la forma final adoptada por los órganos de una planta dependía, sobre todo, de los patrones de división celular durante el desarrollo. Según este punto de vista, la organogénesis vegetal estaría controlada por mecanismos responsables del número de divisiones celulares, de la dirección en la que cada división celular tuviera lugar y de la expansión de las células hasta alcanzar su tamaño definitivo.

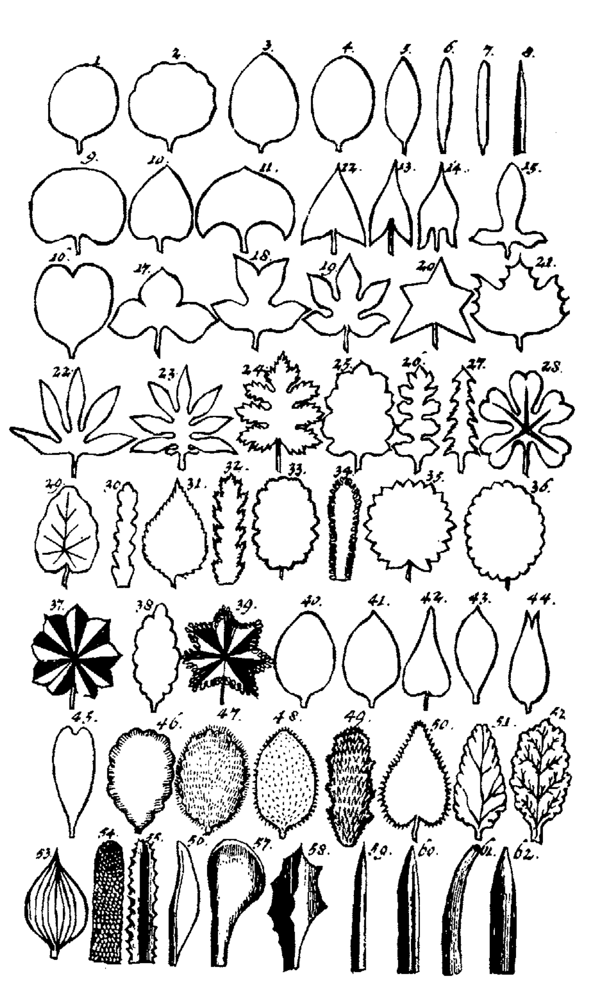
En ese marco teórico, no cabía pensar en mutaciones que, alterando algún parámetro de la proliferación o la diferenciación celular, dejasen de modificar la estructura de la hoja. Pero los resultados experimentales contradicen tales supuestos. Se han identificado genes cuyas mutaciones modifican los patrones de división celular sin perturbar la morfogénesis. Tal es el caso de los alelos mutantes del gen *TANGLED-1* en el maíz, cuyas desviaciones en la orientación de las divisiones celulares no afectan a la forma de la hoja. Y es también el caso de los mutantes *Ton*, en *Arabidopsis thaliana*; en éstos, aunque los planos de división celular están alterados, se mantiene una posición correcta de todos los órganos de la planta.

Partiendo de los mencionados contraejemplos, habrá que aceptar que la morfología de las hojas no depende exclusivamente de los patrones de división celular y que la comunicación intercelular es uno de los procesos responsables de la forma final del órgano. Es difícil explicar de otro modo la coordinación entre células vecinas que necesariamente ha de darse para regular el desarrollo de un órgano cuya forma final es normal, no obstante la manifiesta anormalidad de los patrones de división celular en los mutantes mencionados. Adquiere de este modo rango de protagonista en el desarrollo de las plantas un fenómeno, la comunicación entre células vecinas, que había permanecido en un segundo plano hasta el momento.

En otro orden de cosas, son varios los ejemplos de procesos de desarrollo cuya disección ha sido posible merced a una estrategia similar: partiendo de una mutagénesis de saturación, realizada con el fin de obtener el máximo número posible de muta-



Plantas de Arabidopsis thaliana*, fotografiadas tres semanas después de la germinación. El individuo de la parte inferior izquierda es silvestre y presenta hojas característicamente planas; los restantes, mutantes, con hojas recurvadas hacia el haz (involutas). Los individuos mutantes son homocigóticos para una mutación en genes distintos: están afectados, de izquierda a derecha y de arriba abajo, en los genes* ICU1 (INCURVATA1), ICU6, ICU9, ICU7, ICU3 e ICU8. *Aunque todas las plantas son de la misma edad y han crecido en idénticas condiciones, difieren sustancialmente en el tamaño y la forma de sus hojas. Estas diferencias tan claras en un aspecto importante del desarrollo vegetal, la forma final de un órgano —la hoja—, son observables en* Arabidopsis *en un espacio tan reducido como el de una caja de Petri, y en tan sólo tres semanas desde la siembra*



Tipos de hojas simples recogidos en la Philosophia botanica *de Carolus Linnaeus (1751)*

ciones que perturbasen el proceso a estudio, se ha pasado al análisis de sus interacciones en dobles y triples mutantes, lo que ha permitido la formulación de modelos que, a su vez, terminaron por corroborarse o refutarse mediante la caracterización molecular de algunos de los genes implicados.

A este respecto reviste particular interés la investigación en marcha sobre morfogénesis foliar en *Arabidopsis thaliana*. Tras obtener un amplio repertorio de mutantes viables y fértiles, en los que varía la forma o el tamaño de la hoja, se ha establecido que las variaciones corresponden a 94 genes distintos. Su estudio permitirá desentrañar la morfogénesis foliar de esta planta. El ulterior análisis histológico, genético y molecular de dichos mutantes permitirá determinar el papel de cada uno de los genes afectados, así como las relaciones funcionales entre estos últimos en la ruta del desarrollo de la hoja. Un trabajo semejante hubiese sido casi imposible en un organismo distinto de *Arabidopsis thaliana*, cuyas propiedades singulares la han convertido en la especie de elección preferente para el estudio del desarrollo de las plantas.

José Luis Micol Molina
División de Genética,
Universidad Miguel Hernández,
Alicante

Fecundación

Función de las espermadhesinas

La fecundación es el proceso biológico mediante el cual los gametos masculino (espermatozoide) y femenino (óvulo) se fusionan, iniciando el desarrollo de un nuevo individuo cuyo material genético difiere del de sus progenitores.

Ese modo de reproducción bisexual ha persistido a lo largo de la evolución en muchos metazoos, mamíferos incluidos, por la probable razón de que la recombinación génica evita la acumulación irreversible de mutaciones deletéreas y acelera el proceso de adaptación al medio por selección natural. Mas, pese a su interés para la supervivencia y evolución de las especies, ha avanzado poco nuestro conocimiento de las bases moleculares de la fecundación.

La primera interacción entre un espermatozoide y el óvulo comporta el reconocimiento y unión de proteínas (lectinas) del espermatozoide y estructuras de azúcares unidas a proteínas de la matriz externa del óvulo, la denominada zona pelúcida.

Aunque la hipótesis de que el reconocimiento entre espermatozoide y óvulo se fundaría en la interacción entre moléculas complementarias la postuló F. R. Lillie en 1913, el estado de nuestra comprensión de la identidad de las moléculas que participan en la unión de los gametos sigue siendo muy pobre y se limita a un puñado de especies, sobre todo animales domésticos (cerdo) o de laboratorio (ratón).

Para complicar la situación, cada equipo investigador describe moléculas de adhesión espermatozoide-óvulo distintas, hablen de especies diferentes o de espermatozoides de la misma especie. Quizá no sólo existan múltiples sistemas moleculares de reconocimiento complementarios entre gametos homólogos; la interacción celular podría hallarse también regulada por más de un par receptor-ligando, en cuyo caso el reconocimiento productivo entre gametos homólogos estaría mejor definido por un símil de combinación de caja fuerte que por la hipótesis original de sistema del tipo llave-cerradura.

Un estudio profundo del mecanismo y evolución de la fecundación requiere, pues, la caracterización estructural de todos los partícipes de este proceso, así como definir la jerarquía funcional entre ellos.

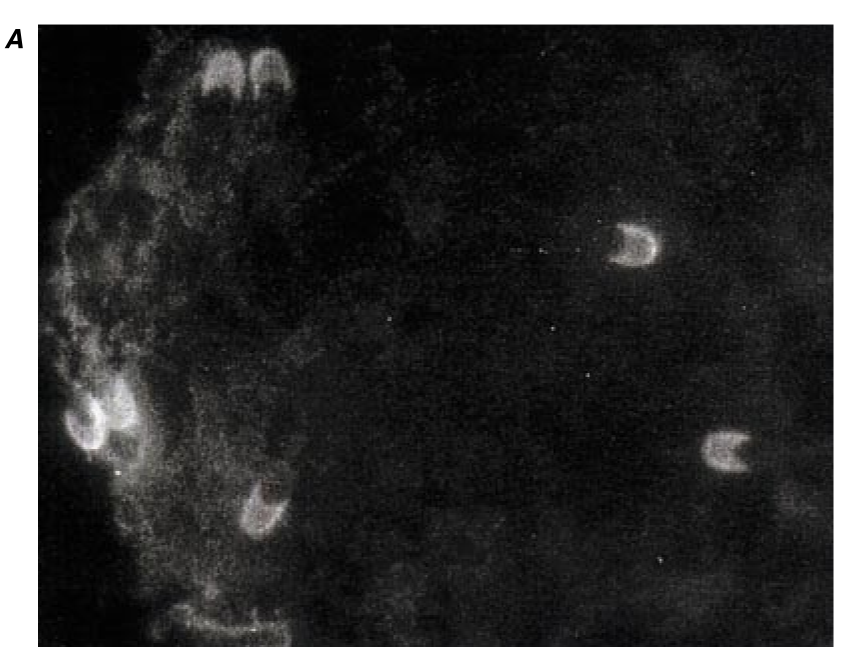
En el cerdo, las espermadhesinas constituyen una familia de proteínas que comparten estructura, son pequeñas (110-133 aminoácidos) y las sintetizan células epiteliales de las vesículas seminales y de la *rete testis* (la región donde los túbulos seminíferos de los testículos desembocan en el ducto del epidídimo).

Las espermadhesinas cubren masivamente la membrana plasmática de la vesícula acrosomal de la cabeza de espermatozoides porcinos: un espermatozoide eyaculado contiene 10-60 millones de estas moléculas. Sin embargo, sólo un 10 % de dicha cantidad sigue presente en espermatozoides capacitados *in vitro*. Las espermadhesinas poseen capacidad de unir glicoproteínas de la zona pelúcida de ovocitos homólogos, pues reconocen azúcares con β-galactósidos.

Cuando se incuban ovocitos porcinos con espermadhesinas sueltas, éstas saturan y bloquean los lugares de unión de espermatozoides. La unión de espermatozoides a la zona pelúcida de óvulos parece estar mediada por azúcares neutros. La estructura de los azúcares de las glicoproteínas de la zona pelúcida, establecida por el método de la resonancia magnética nuclear, ha revelado que, pese a su notable heterogeneidad, la mayoría de las estructuras de oligosacáridos neutros contienen epítopos de reconocimiento para espermadhesinas.

Ante esos y otros, resultados experimentales, sospechamos que las espermadhesinas podrían cumplir una doble función en la fecundación porcina. Por un lado, las espermadhesinas formarían un recubrimiento molecular que protegería a la membrana acrosomal, la mayor parte del cual se liberaría durante el tránsito y la capacitación en el tracto genital de la hembra. Por otro, las moléculas de espermadhesinas que

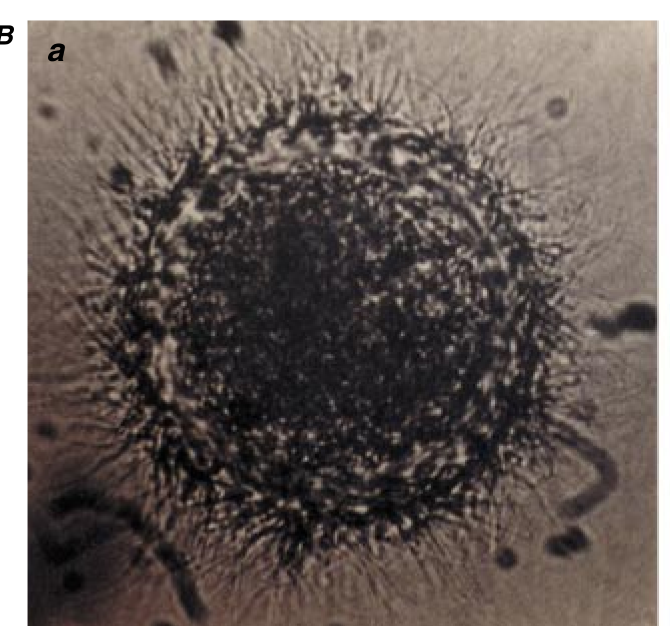
A



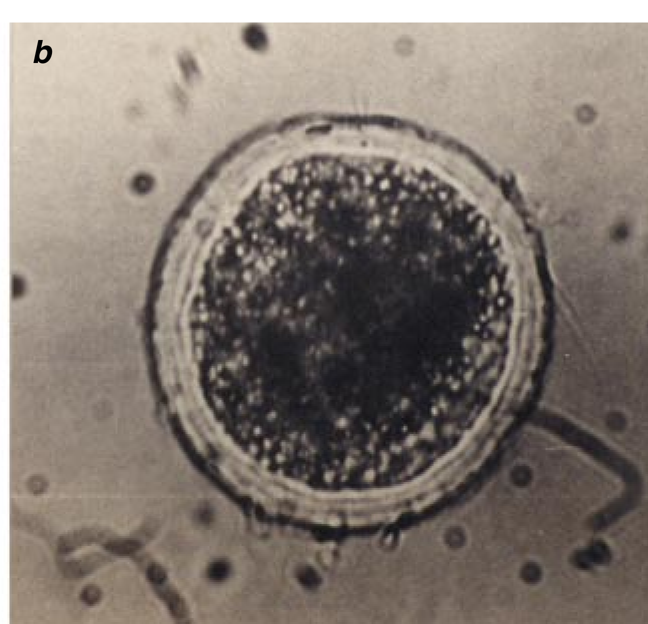
Localización mediante microscopía de inmunofluorescencia de espermadhesinas sobre la cabeza de espermatozoides porcinos (A). Unión de espematozoides porcinos a un óvulo de cerda antes (a) y después (b) de incubación del ovocito con espermadhesinas aisladas (B). Cristal de PSP-I/PSP-II (C). Estructura tridimensional de una molécula de espermadhesina (D)

B

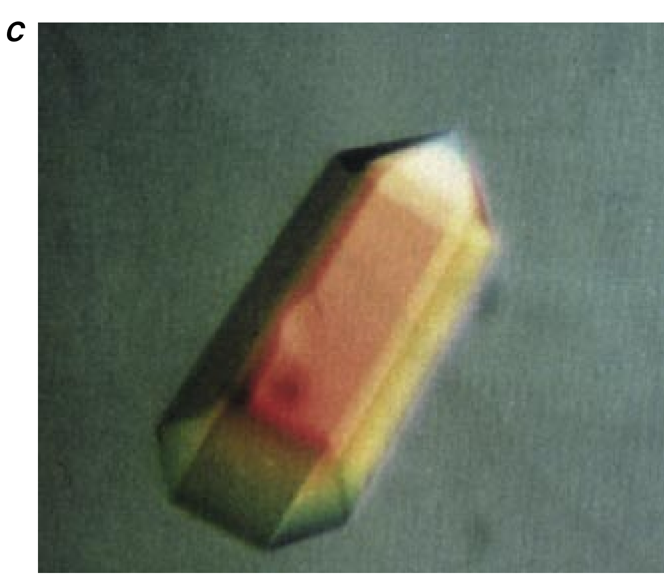
a



b



C



D



permanecieran firmemente unidas a la membrana acrosomal constituirían parte del sistema de adhesión entre los gametos.

En el plasma seminal y en espermatozoides de caballo hemos caracterizado una espermadhesina cuya secuencia de 133 aminoácidos difiere en sólo tres restos de la espermadhesina porcina AWN. Ambas desempeñan las mismas funciones. Semejante homología tan estrecha entre proteínas de un artiodáctilo y de un perisodáctilo, especies que divergieron de un antecesor común hace más de 50 millones de años, induce a pensar que la estructura de esta espermadhesina se halla sometida a presión de selección, lo que refuerza nuestra hipótesis sobre la importancia funcional de las espermadhesinas en el cerdo y el caballo.

El reconocimiento entre gametos mediado por moléculas de espermadhesinas no constituye, sin embargo, un mecanismo general. En el plasma seminal del toro existe cierta proteína (denominada aSFP) que, si bien guarda parecido estructural con las espermadhesinas (50% de identidad de secuencia), no posee ni capacidad de unión a los espermatozoides, ni actividad de reconocimiento de glicoproteínas de la zona pelúcida bovina. Hay investigaciones en marcha para dilucidar la presencia y papel funcional de espermadhesinas en otras especies, incluida la humana.

Hemos logrado cristalizar en el laboratorio la espermadhesina porcina PSP-I/PSP-II y establecer su estructura tridimensional mediante cristalografía de rayos X. Estos datos estructurales, que son los primeros de una proteína que une zona pelúcida, sientan las bases para, en posteriores estudios de complejos integrados por espermadhesina-oligosacáridos, empezar a definir el mecanismo atómico del reconocimiento entre los gametos de una especie animal.

JUAN J. CALVETE
Institut für Reproduktionsmedizin, Hannover
e Instituto de Química-Física "Rocasolano"
LIBIA SANZ
Institut für Reproduktionsmedizin, Hannover
ANTONIO ROMERO
Y PALOMA F. VARELA
Centro de Investigaciones Biológicas CSIC, Madrid

Cuantificación del gluten

Por espectrometría de masas

Los enfermos celiacos no pueden ingerir alimentos elaborados con trigo, cebada, centeno o avena. La razón: padecen una intolerancia permanente al gluten —un complejo proteínico de los cereales— cuya presencia en la dieta determina una lesión severa de la mucosa intestinal. La lesión histológica se caracteriza por hiperplasia de criptas con atrofia total o subtotal vellositaria.

La fracción proteica de trigo responsable de la patología celiaca son las denominadas gliadinas. Hoy se sabe que la enfermedad se desencadena también cuando los individuos con predisposición genética ingieren gluten de otras especies de cereales que guardan parentesco taxonómico con el trigo como la cebada (hordeínas), el centeno (secalinas) y posiblemente la avena (aveninas).

El único tratamiento posible para los pacientes celiacos es el seguimiento de una dieta estrictamente libre de gluten, lo cual implica la ingesta exclusiva de alimentos cuyo contenido de gluten se encuentre por debajo del límite de toxicidad (1-5 mg por cada 100 g de alimento).

Para determinar el gluten se recurre a ensayos inmunitarios de tipo ELISA ("enzyme-linked immunosorbent assay"). Estos métodos epítopo-dependientes emplean anticuerpos monoclonales o policlonales frente a diversos componentes de trigo (extractos, fracciones o péptidos sintéticos de gliadinas). No obstante, la comparación de la composición exacta de gluten proporcionada por distintos formatos de ELISA, especialmente para contenidos bajos de gluten cercanos al umbral tóxico, revela la falta de coherencia de tales métodos, lo que les quita fiabilidad. Ahí se esconde uno de los problemas más graves a la hora de controlar la dieta de enfermos celiacos; son muy numerosos los alimentos que contienen cantidades pequeñas de gluten (sin controlar) y que convierten a dichos enfermos en consumidores larvados de estas sustancias tóxicas, dejando la puerta abierta para el desarrollo de neoplasias en la edad adulta.

No existe todavía un método seguro que garantice la cuantificación exacta de gluten en los alimentos. De ahí que revista el máximo interés la elaboración de procedimientos alternativos o complementarios a los inmunitarios.

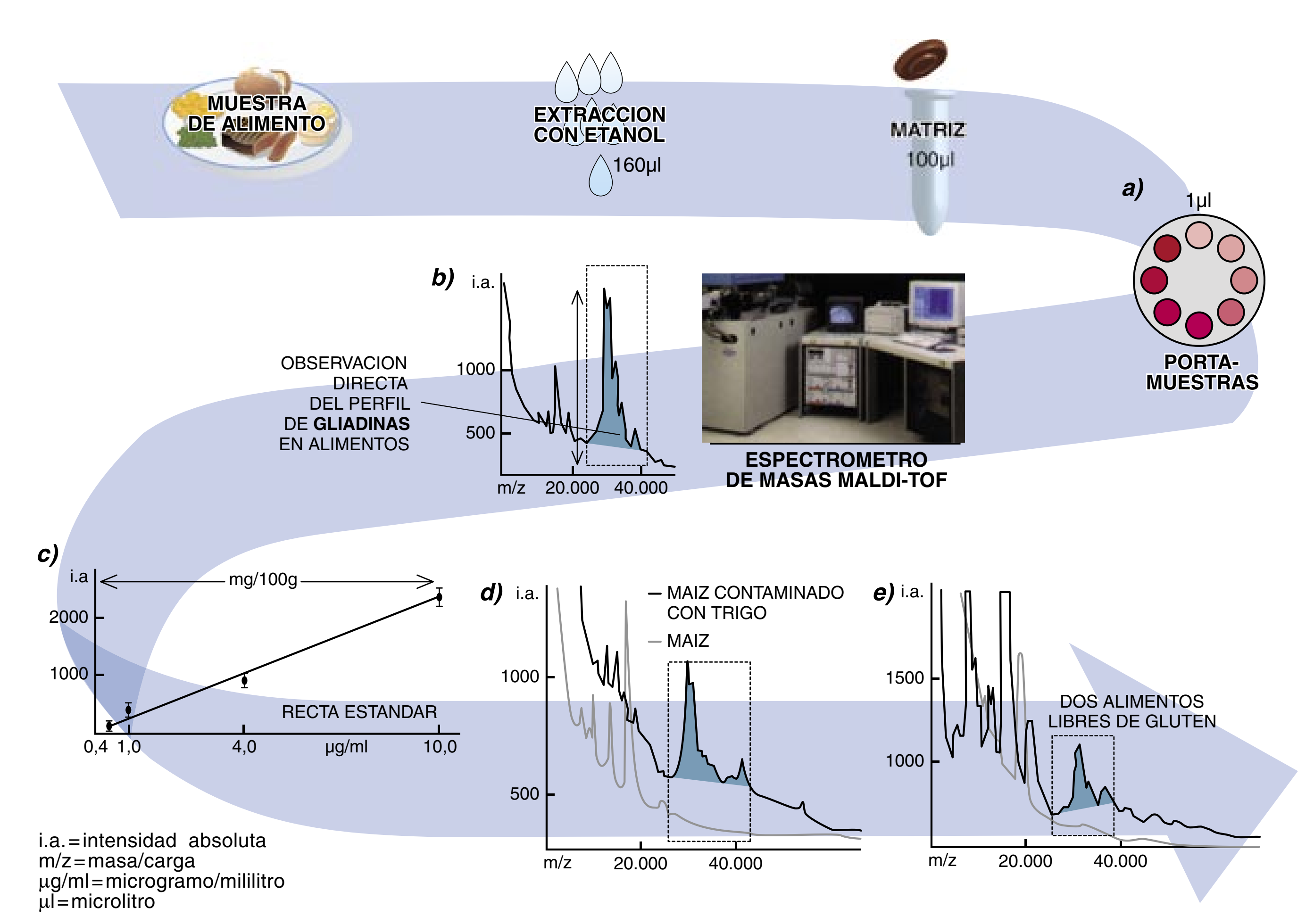
El primer método fallido no vinculado al ensayo inmunitario de detección de gluten se basó en el análisis por la reacción en cadena de la polimerasa (RCP). Sin embargo, la técnica, capaz de detectar trazas de ADN, no es cuantitativa y además adolece del grave inconveniente de identificar un componente no tóxico como el ADN, mientras que la toxicidad se halla en la fracción proteica de las prolaminas del gluten.

La técnica de espectrometría de masas por tiempo de vuelo con desorción e ionización láser asistida por matriz (MALDI-TOF) se ha convertido en los últimos años en una poderosa herramienta en las ciencias de la vida para el análisis rápido y directo de extractos biológicos complejos, incluyendo los extractos de proteínas de cereales.

Recientemente demostramos que esta técnica de espectrometría de masas MALDI-TOF permitía obtener directamente el perfil de masas característico del gluten de trigo, cebada, centeno y avena. Estos resultados nos permitieron desarrollar un nuevo método de detección de gluten en muestras de alimentos basado en la simple observación del perfil característico de gliadinas en dichas muestras.

Se trata de un método rápido (pocos minutos), en el que el manejo e interpretación de los espectros son sencillos, fácil y reproducible la manipulación de la muestra y, bajísimo, el costo del análisis. El método puede emplearse como un sistema cualitativo rápido de rastreo, capaz de determinar en pocos minutos la presencia de gluten en alimentos a través de la observación directa del perfil característico de gliadinas tanto en alimentos procesados como sin procesar.

Así pues, la técnica de espectrometría de masas constituye el primer sistema descrito no inmunitario y cuantitativo que permite detectar gliadinas hasta concentraciones de 0,4 mg/100 g de alimento, es decir, por debajo del umbral de toxicidad y con una aceptable respuesta lineal en el intervalo de 0,4 a 10 mg/100 g de alimento. Las muestras de alimentos con y sin gluten analizados simultáneamente por espectrometría de masas y un ELISA casero mostraron una gran correlación entre ambas técnicas.



Representación esquemática del análisis cualitativo y cuantitativo de gliadinas por espectrometría de masas MALDI-TOF. En una primera etapa, las gliadinas se extraen con etanol de los alimentos; luego, durante 1-2 minutos se deja co-cristalizar un microlitro de la mezcla de este extracto etanólico con la matriz en un portamuestras (a)*. A continuación se introduce el porta en un espectrómetro de masas para su análisis. La ilustración muestra:* (b) *el perfil característico de la región de gliadinas;* (c) *el rango de linealidad y sensibilidad del sistema midiendo la altura de la señal de la α-gliadina más intensa en un estándar de gliadinas empleado como patrón. El sistema sirve como método rápido de rastreo al poder visualizar la presencia de gliadinas de trigo en alimentos contaminados* (d) *o libres de gluten* (e)*. Asimismo, los niveles de gliadinas de estos alimentos pueden determinarse por medio de la recta estándar*

En comparación con ELISA, la espectrometría de masas ofrece las siguientes ventajas: *a*) para muestras con bajo contenido en gluten, el análisis puede hacerse directamente de los extractos etanólicos, mientras que ELISA muestra poca tolerancia hacia el alcohol; *b*) el método de la espectrometría admite compatibilidad con numerosos tampones, sales, detergentes no iónicos y agentes reductores; *c*) en oposición a ELISA, la espectrometría de masas está exenta de errores derivados del manejo de tampones, elección de anticuerpos y estándares, recubrimiento y almacenamiento de placas, estabilidad de los conjugados, incubación y lectura de intensidad de color, y *d*) los espectros de masas permiten identificar visualmente si el alimento tiene mezclas de gluten de trigo, cebada, centeno o avena. La espectrometría de masas permite estudiar además la alteración de las gliadinas presentes en los alimentos durante el proceso de cocción y proporciona una valiosa información sobre el efecto del calor por medio de los cambios observados en las señales de masas de estas proteínas.

Pero no todo son ventajas. El costo de un equipo de masas es superior al de un sistema ELISA y su capacidad de procesamiento de muestras es inferior.

Este estudio constituye un primer esfuerzo para establecer la técnica MALDI-TOF como una nueva herramienta en la detección de gluten en alimentos. La introducción de mejoras adicionales, como el aumento de sensibilidad, la corrección de datos empleando estándares internos, la determinación de la especificidad frente a distintos tipos de gluten, etcétera, contribuirá a sentar las bases de un procedimiento general de cuantificación de gluten en alimentos complementario a los métodos convencionales. No obstante, el método ideal capaz de controlar rigurosamente la dieta de los enfermos celiacos deberá estar basado en análisis de toxicidad.

EMILIO CAMAFEITA,
PATRICIA ALFONSO
y ENRIQUE MÉNDEZ
Unidad de Análisis
Estructural de Proteínas
Centro Nacional de Biotecnología,
Madrid

De cerca

Texto y fotos: Albert Masó

Los vigilantes del desierto

Esos animalillos que en la lejanía parecen perritos de la pradera son, en realidad, suricatos (*Suricata suricatta*). Vivérridos del desierto sudafricano, se alimentan de insectos y pequeños vertebrados. Para defenderse de las duras condiciones exteriores, literalmente se entierran. Construyen larguísimas madrigueras comunitarias con muchas entradas, lo que les permite ir rastreando el territorio sin alejarse de una boca por donde huir en seguida ante cualquier peligro.

Los suricatos poseen una estructura social compleja, que incluye la planificación de la seguridad del grupo. Esto es lo que refleja la fotografía superior a la izquierda, donde cada individuo monta guardia en una entrada y otea un sector complementario del entorno: izquierda, de frente y derecha. En cuanto alguno detecte un intruso, emitirá un grito de alarma y todos desaparecerán... tragados por la tierra.



Técnica fotográfica:

En la técnica denominada "caza fotográfica" no siempre se utilizan potentes teleobjetivos. La primera toma, por ejemplo, se ha realizado con un objetivo normal de 85 mm (f. 1,8) porque interesaba captar la escena completa de los tres individuos. Esto se consigue gracias al ángulo de cobertura de 28º.

En la segunda composición, los dos ejemplares se habían alejado del fotógrafo. Hubo que emplear un teleobjetivo de 400 mm (f. 5,6), es decir, con 6º de cobertura. Por fin, para obtener la tercera imagen colocamos un teleconvertidor (2x) entre la óptica y el cuerpo de la cámara. Así se duplica la distancia focal (800 mm) y el ángulo se reduce a la mitad: 3º.

Geometría biológica

Las reglas universales que rigen en la construcción se aplican a la formación de estructuras orgánicas, desde moléculas hasta tejidos

Donald E. Ingber

La vida representa el ejemplo supremo del funcionamiento de la complejidad. Todos los organismos, lo mismo la bacteria que el chimpancé, llegan a su etapa final de desarrollo a través de una serie compleja de interacciones en las que intervienen numerosísimos componentes diversos. Estos componentes, o subsistemas, están a su vez constituidos por otros componentes moleculares menores, dotados de su propio dinamismo que ejercen por sí mismos, verbigracia, catalizar reacciones químicas. Cuando, además, se combinan para dar unidades operativas superiores —una célula o un tejido— afloran nuevas propiedades, imprevistas; podemos citar entre las emergentes la capacidad de movimiento, de cambiar de forma o de crecer.

De un tiempo a esta parte los expertos han tomado conciencia de ese hecho, curioso y sorprendente a la vez. Sin embargo, la mayoría prefiere obviarlo en sus investigaciones sobre los fundamentos de la vida. En los últimos decenios la ciencia ha ampliado su horizonte sobre el modo de funcionar del organismo humano con la dilucidación de las propiedades del ADN (componente de los genes) y otros materiales y moléculas fundamentales de la vida. Los biólogos se proponen ahora identificar cada uno de los genes que componen el genoma característico del sujeto humano. Al ser los genes los "planos arquitectónicos" de las proteínas, moléculas clave, este núcleo esencial de la biología molecular permitirá disponer, en un futuro no lejano, del catálogo completo de las moléculas fundamentales que forman parte del organismo humano. Pero no basta con conocer las partes integrantes de una máquina compleja para explicar el funcionamiento del sistema entero. Y eso rige lo mismo para un motor de combustión que para una célula. La identificación y descripción de cada una de las piezas del rompecabezas sirven para muy poco, si no comprendemos las reglas de su ensamblaje.

Que la naturaleza aplica reglas de construcción comunes se infiere de la repetición —en todas las escalas, de la molecular a la del mundo macroscópico— de espiras, pentágonos y formas triangulares, entre otras pautas. Estos patrones aparecen en estructuras muy dispares, que van desde cristales de una gran regularidad hasta proteínas bastante irregulares, y en organismos diversos (virus, plancton y hombre, por citar algunas muestras). Después de todo, la materia orgánica y la inorgánica constan de unos mismos sillares: átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y fósforo. Sólo difieren en la disposición de los átomos en el espacio tridimensional.

Este fenómeno en cuya virtud los componentes se unen entre sí para formar estructuras de mayor complejidad y estabilidad, en que aparecen nuevas propiedades imposibles de predecir a partir de las características de las partes individuales, recibe el nombre de autoensamblaje. Lo observamos de continuo en la naturaleza y a escalas muy diversas. En el cuerpo humano, las macromoléculas se autoensamblan para configurar orgánulos, que a su vez se autoensamblan en células, que lo hacen en tejidos y éstos en órganos. El resultado es un cuerpo organizado de un modo jerárquico e integrado por sistemas subsumidos en sistemas. Si queremos, pues, comprender en su plenitud la formación y operación de los seres vivos, necesitamos descubrir los principios básicos que dirigen la organización biológica.

A pesar de los años empeñados, los investigadores no acaban de desentrañar las fuerzas que dirigen a los átomos en su autoensamblaje para formar moléculas. Mucho queda por conocer sobre la trabazón entre grupos

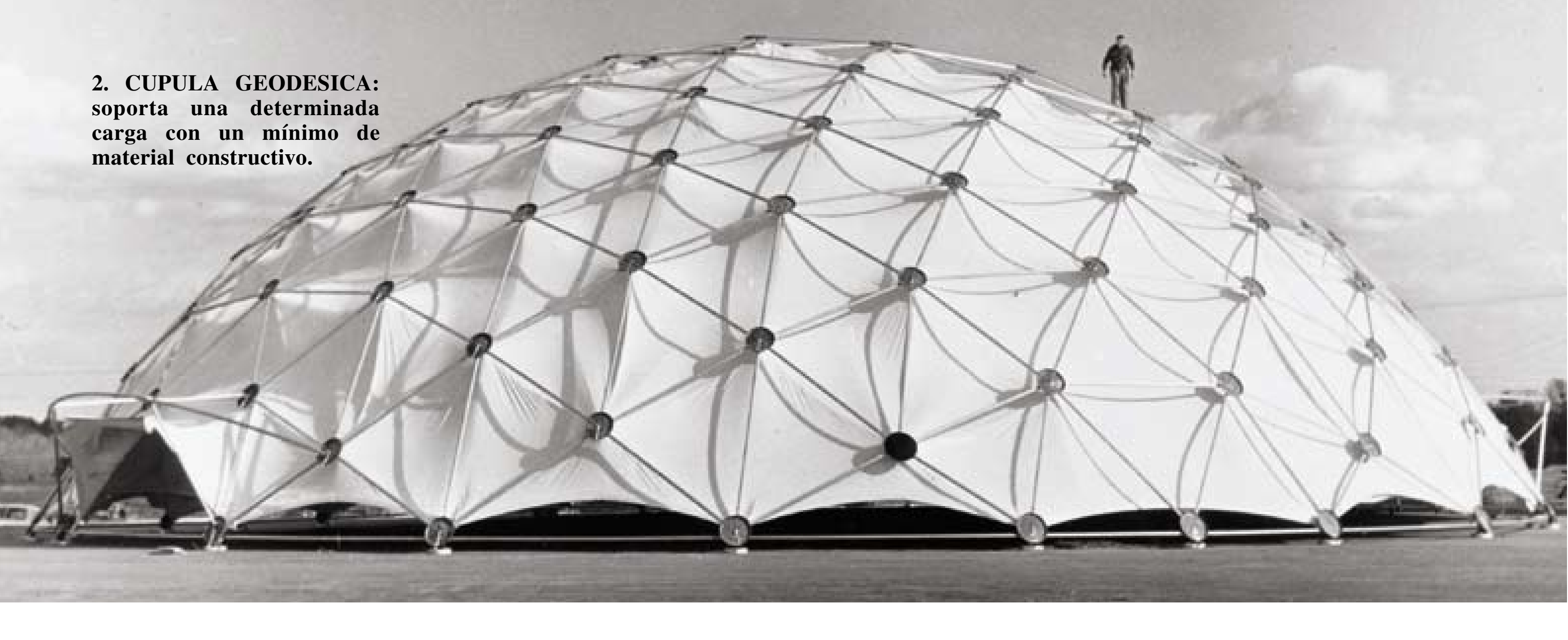
de moléculas que resulte en la formación de células y tejidos. He dedicado los últimos veinte años al descubrimiento y exploración de un aspecto asombroso, presumiblemente fundamental, del proceso de autoensamblaje. Una sorprendente variedad de sistemas naturales, incluidos los átomos de carbono, las moléculas de agua, proteínas, virus, células, tejidos e incluso el organismo humano y otros seres vivos están construidos sobre la base de un modelo arquitectónico común conocido como integridad tensional ("tensegrity"). Con tal expresión se indica que el sistema se estabiliza mecánicamente a sí mismo en razón del modo en que las fuerzas de compresión y tensión se distribuyen y equilibran dentro de la estructura.

Este hallazgo fundamental podría tener algún día aplicaciones prácticas en muchos campos. En el ámbito celular, la idea de integridad tensional ha permitido comprender mejor la manera en que la forma celular y las fuerzas mecánicas —presión en los vasos sanguíneos o compresión en el hueso— influyen sobre las actividades de los genes. Al mismo tiempo, una mejor comprensión de las fuerzas naturales del autoensamblaje nos llevará a extraer un rendimiento más alto de los datos que se van acumulando acerca de las moléculas, células y otros componentes biológicos, en múltiples aplicaciones que van del diseño de fármacos a la ingeniería de tejidos. Si terminamos por saber el motivo de esa implicación frecuente de la integridad tensional en la naturaleza, estaremos en óptima disposición para ahondar en las fuerzas fundamentales que dirigen la organización de los seres vivos y, tal vez, en la propia evolución.

Mi interés en la integridad tensional se remonta a mis tiempos de estudiante en la Universidad de Yale, mediados los años setenta. Las lecciones de biología celular, conjugadas con las de escultura, me hicieron caer en la cuenta de que la formación de los seres vivos y de sus componentes guardaba con la arquitectura una vinculación más estrecha que con la química. Las moléculas que forman nuestras células, y las células que integran los tejidos, se renuevan sin cesar. El fundamento de lo que se expresa como algo vivo es el mantenimiento del patrón arquitectónico.

Las estructuras que responden a este modelo de integridad tensional no alcanzan la estabilidad mecánica por la resistencia de los miembros individuales, sino por la manera en que la estructura en su conjunto distribuye y equilibra las tensiones mecánicas. Las estructuras caen dentro de dos categorías. En una primera se incluyen las estructuras integradas por un retículo constituido por puntales o sustentáculos rígidos, cada uno capaz de soportar fuerzas de tensión o de compresión. El ejemplo arquetípico son las cúpulas geodésicas de Buckminster Fuller. Los sustentáculos se conectan para crear triángulos, pentágonos o hexágonos; cada sustentáculo está orientado de suerte tal, que confina cada articulación en una posición fija, asegurándose así la estabilidad de la estructura global.

1. LA INTEGRIDAD TENSIONAL es un modelo arquitectónico en el que las estructuras se autoestabilizan mediante el equilibrio entre fuerzas antagónicas de compresión y tensión. La integridad tensional confiere forma y consistencia lo mismo a las estructuras naturales que a las artificiales. El citoesqueleto de una célula (*fondo*) constituye un armazón montado con microtúbulos y filamentos interconectados. La relación dinámica de estos elementos estructurales recuerda una escultura (*en el centro*) de Kenneth Snelson, en la que unos cables unen tubos alargados.



2. CUPULA GEODESICA: soporta una determinada carga con un mínimo de material constructivo.

La otra categoría de estructuras del modelo de integridad tensional abarca cuantas se estabilizan a través del pretensado. Se dio a conocer este tipo de estructura en la obra del escultor Kenneth Snelson. En sus creaciones artísticas, los elementos estructurales que pueden soportar sólo tensión difieren de los que soportan compresión. Antes de someter una de estas estructuras a una fuerza externa, todos los elementos estructurales están ya en tensión o compresión, es decir, están pretensados. Dentro de la estructura, los sustentáculos rígidos que soportan la compresión estiran, o tensan, los elementos flexibles que soportan la tensión, mientras que los elementos que soportan la tensión comprimen los sustentáculos rígidos. Estas fuerzas neutralizadoras, que se equilibran por toda la estructura, posibilitan la estabilidad de la obra entera.

Ambas categorías de este modelo de integridad tensional comparten un rasgo esencial: la tensión se transmite sin solución de continuidad a través de todos los elementos estructurales. En otras palabras, un incremento de tensión en un elemento cualquiera de la estructura se hace sentir en todos los demás, incluso en los elementos situados en el lado opuesto. Este aumento global de la tensión se equilibra por un aumento en la compresión en determinados elementos distribuidos por la estructura. Tenemos, pues, que la estructura se autoestabiliza mediante un mecanismo que Fuller caracterizó como tensión ininterrumpida y compresión local. En la mayoría de los edificios, en cambio, la estabilidad se basa en una compresión continua instada por la fuerza de la gravedad.

Los elementos que soportan la tensión en las cúpulas de Fuller y en las esculturas de Snelson señalan el camino más corto entre elementos adyacentes (y están dispuestos, por tanto, geodésicamente). Las fuerzas de tensión se transmiten a través de la distancia más corta entre dos puntos, lo que significa que los elementos de una estructura tal se distribuyen de una manera óptima para soportar tensiones. Por esa razón las estructuras de integridad tensional ofrecen una resistencia máxima para una determinada cantidad de material de construcción.

¿Qué tiene que ver la integridad tensional con el organismo humano? Los principios del modelo de integridad tensional tienen validez para las diversas escalas presentes en el organismo. Los 206 huesos que constituyen nuestro esqueleto se yerguen contra la gravedad y se estabilizan en un porte vertical por la tensión de los músculos tensores, tendones y ligamentos (semejantes a los cables de las esculturas de Snelson). En otras palabras, en la compleja estructura de integridad tensional de nuestro interior, los huesos son los sustentáculos de compresión, mientras que músculos, tendones y ligamentos constituyen los elementos que soportan la tensión. En un rango molecular, las proteínas y otros compuestos clave del organismo se estabilizan también gracias a los principios de la integridad tensional. Mis intereses personales caen entre ambos extremos, la escala celular.

En mi etapa de doctorando bajo la dirección de James D. Jamieson en Yale me centré en las interacciones mecánicas entre componentes de los sistemas biológicos, en las células de modo particular. Por aquel entonces, finales de los años setenta, los biólogos consideraban la célula un fluido o gel viscoso, rodeado por una membrana; una suerte de bolita rellena de melaza. Se sabía que las células contenían un andamiaje interno, un citoesqueleto, que constaba de tres tipos de polímeros proteicos: microfilamentos, filamentos intermedios y microtúbulos. Pero se ignoraba la función respectiva de cada uno en el control de la morfología celular.

Otro de los misterios de aquel entonces guardaba relación con el modo de actuación de las células, aisladamente consideradas y colocadas sobre distintas superficies. Tiempo atrás se había descubierto que las células se aplanaban al adherirse a una placa de vidrio o un frasco de cultivo. En 1980, sin embargo, Albert



3. LAS CELULAS deforman un substrato de caucho al ejercer fuerzas de tracción en los puntos de adherencia.

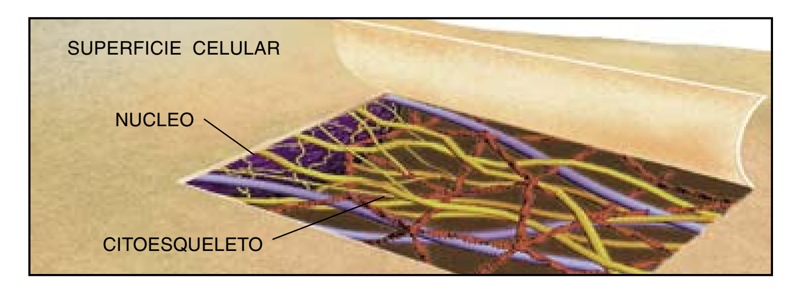
4. **MODELO CELULAR de integridad tensional, construido con varillas y fibras elásticas. Lo mismo que la célula viva, el modelo se aplana junto con su núcleo cuando se une a una superficie rígida (*izquierda*) y se retrae adoptando una forma más esférica sobre un substrato flexible, deformando la superficie de éste (*derecha*).**

K. Harris, de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, observó que, cuando se fijaban sobre una superficie flexible de caucho, las células se contraían y adoptaban una forma más esférica. Esta contracción provocaba la ondulación del caucho de apoyo.

Se me ocurrió que una concepción de la célula que la asociara a una estructura de integridad tensional daría oportuna razón de tales fenómenos. Y modelé una célula de acuerdo con esa idea. Me procuré seis varillas de madera y cuerda elástica. Distribuí las varillas —que habrían de soportar la compresión— en tres parejas. Cada pareja quedaba perpendicular a las otras dos, sin que ninguno de estos puntales de madera estuviera en contacto. Uncí la cuerda elástica, portadora de tensión, a los extremos de todas las varillas; tiré hasta conseguir una forma tridimensional estable. Introduje otro modelo de integridad tensional, menor y esférico, que representaba el núcleo, en el interior de la estructura mayor que representaba el resto de la célula. A continuación, y para remedar las conexiones citoesqueléticas entre el núcleo y el resto de la célula, tensé los hilos elásticos entre la estructura más amplia y la menor del interior.

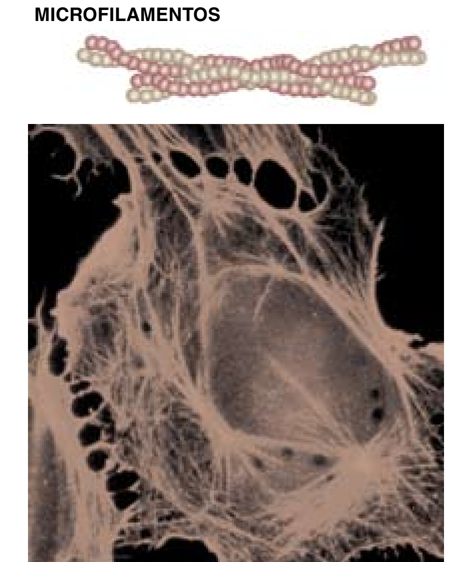
Para entender el significado del modelo, conviene saber que, al ejercer presión sobre semejante prototipo de integridad tensional, éste se ve forzado a adoptar lo que aparenta ser una pila aplanada de estacas y cuerdas. En cuanto se retira la presión, la energía almacenada en los filamentos tensos hace que el modelo recupere su forma original esférica. Para simular el comportamiento de las células expuestas sobre una superficie, imité un substrato de cultivo sólido de vidrio o plástico estirando un paño, bien sujeto con chinchetas al soporte de madera. Afirmé al sustrato el modelo aplanándolo y amarrando algunas varillas al trozo de paño. Estos puntales de asentamiento remedarían las moléculas de superficie, cuya naturaleza por fin conocemos: se trata de integrinas o receptores de adhesión, que se encargan de unir físicamente la célula al substrato de anclaje.

Con los extremos de las varillas fijos sobre el paño, el modelo permanecía aplanado, exactamente igual que le acontece a la célula cuando descansa sobre un substrato duro. Cuando solté las chinchetas que fijaban el paño a la madera, y dejé así móvil la superficie de anclaje, mi prototipo de integridad tensional adoptó de inmediato su forma globular arrastrando consigo la tela.

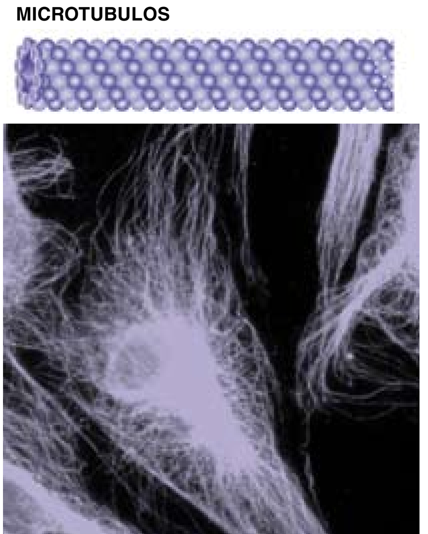


5. **CITOESQUELETO, formado por microfilamentos (*abajo a la izquierda*), microtúbulos (*abajo en el centro*) y filamentos intermedios (*abajo a la derecha*) con una sección de nanómetros. La estructura redondeada del centro de cada fotografía corresponde al núcleo celular. Los tres componentes están interconectados y forman el retículo del citoesqueleto, que se extiende desde la superficie celular hasta el núcleo (*arriba a la izquierda*). La estructura molecular de cada componente aparece encima de la correspondiente fotografía y el código de colores coincide con el utilizado en la ilustración que está arriba a la izquierda.**

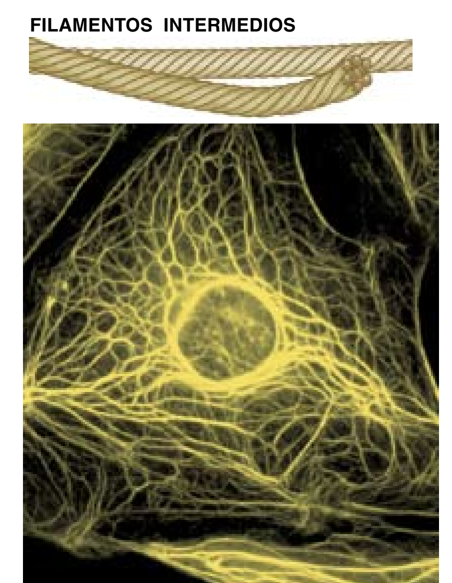
MICROFILAMENTOS

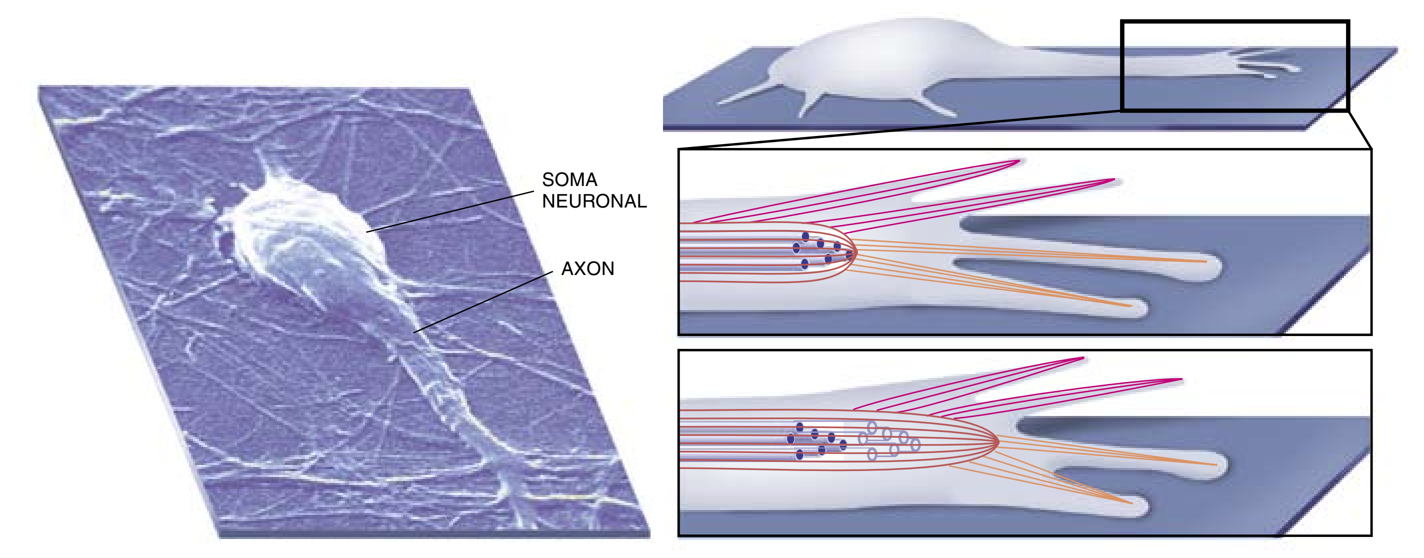


MICROTUBULOS



FILAMENTOS INTERMEDIOS



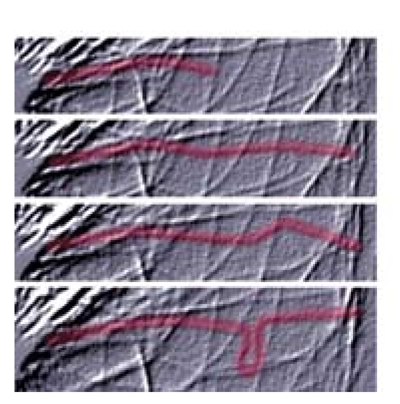


6. LA NEURONA se prolonga en un axón que pone en contacto unas células nerviosas con otras (*arriba a la izquierda y parte superior de la derecha*). Los axones crecen a partir del soma neuronal (*esquemas a la derecha*); lo hacen, por ejemplo, durante la reparación de una lesión. Se forman esas extensiones mediante el alargamiento de microtúbulos (*morado*). Los microfilamentos contráctiles (*rojo*) rodean estas fibras moleculares internas, las comprimen y acotan su desarrollo. Los microfilamentos, sin embargo, conectan con otros (*naranja*) que se extienden hacia los puntos donde se produce el anclaje de la célula en el substrato subyacente (*centro*). Tirando de estos puntos de adherencia, los microfilamentos posibilitan que los microtúbulos se elonguen y, con ellos, se expanda el cilindroeje (*abajo*).

Observé también que, si tensaba el modelo, aplanado en su unión al trozo de paño, la célula y el núcleo de su interior se extendían de manera coordinada. El modelo de núcleo también se desplazaba hacia el fondo del simulacro de célula. Poco después demostraba ya experimentalmente que las células vivas y los núcleos se expandían y polarizaban de suerte similar cuando se adherían a un substrato. Con semejante artificio celular tan sencillo, ponía de manifiesto que las estructuras de integridad tensional remedaban el comportamiento de las células vivas.

En los años que siguieron a mis experimentos con modelos celulares, la ciencia ha ido avanzando en el conocimiento del mecanismo celular. Todo indica que las células adoptan su morfología gracias a la integridad tensional. Además, tal y como predicen los modelos, la arquitectura de la mayoría de las células depende no sólo de los tres tipos principales de filamentos del citoesqueleto sino también de la matriz extracelular, el andamiaje donde se anclan y afirman las células en el organismo.

Recorre en el interior celular una filigrana de microfilamentos contráctiles; este elemento clave del citoesqueleto ejerce tensión, en concreto tira de la membrana celular y de todos sus constituyentes hacia el núcleo. A esa fuerza de tracción se oponen dos tipos fundamentales de elementos de compresión, uno situado en el exterior y otro en el interior de la célula. El componente situado a extramuros de la célula es la matriz extracelular; los puntales de compresión del interior serán microtúbulos o haces grandes de microfilamentos entrecruzados en el interior del citoesqueleto. El tercer componente del citoesqueleto, los filamentos intermedios, son grandes integradores, que conectan microtúbulos y microfilamentos contráctiles entre sí, con la membrana de la superficie de la célula y con el núcleo. Al actuar, además, como tirantes, confieren rigidez al núcleo central y lo fijan en su posición. Aunque el citoesqueleto está rodeado de membranas y bañado por un líquido viscoso, es esa red de tirantes y cables moleculares lo que estabiliza la morfología de la célula.



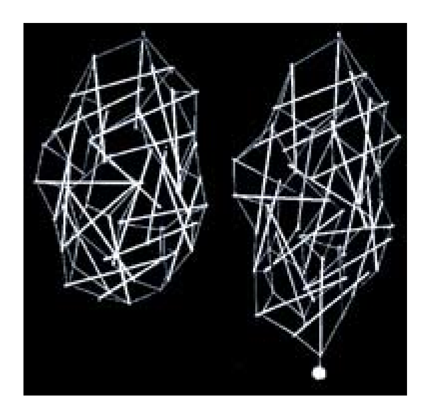
7. UN MICROTUBULO en crecimiento forma un bucle al comprimirlo, según se aprecia en estas imágenes tomadas con vídeo a cámara lenta. Se engendran bucles cuando el microtúbulo se alarga y choca contra otros componentes del citoesqueleto.

Si la célula y el núcleo están físicamente conectados por filamentos tensores y no sólo por un líquido citoplasmático, la tracción sobre los receptores de la superficie celular debe llevar consigo cambios estructurales en las profundidades de la célula. Andrew Maniotis, adscrito a mi grupo de trabajo en el hospital pediátrico de la Facultad de Medicina de Harvard, lo demostró de modo directo. Después de unir micropipetas a los receptores de adhesión asentados en la superficie celular y tirar hacia fuera, Maniotis provocó que los filamentos del citoesqueleto y las estructuras del núcleo se realinearan de inmediato en la dirección de la tracción. De acuerdo con lo previsto en mis experimentos, ni la célula ni el núcleo se comportaban como una bolita viscosa.

La potencia explicativa de la integridad tensional no se limita a la estabilización de la morfología celular o nuclear. Steven R. Heidemann, en colaboración con Harish Joshi y Robert E. Buxbaum, de la Universidad estatal de Michigan, hallaron, mediados los ochenta, que la integridad tensional daba razón del mecanismo de que se valían las neuronas para emitir axones, largas prolongaciones repletas de microtúbulos y transmisoras de señales eléctricas en el sistema nervioso. Esta formación es necesaria para la reparación de una lesión del nervio.

El grupo de Heidemann vio en el interior de los axones que los microtúbulos se comprimían en sus extremos

con la tracción ejercida por los microfilamentos contráctiles que los rodean. Y, lo que revestía mayor interés, se ha descubierto que el ensamblaje de microtúbulos (elongación) —y de ahí la extensión de los axones— viene desencadenado por el desplazamiento de las cargas de compresión desde el microtúbulo hacia los enganches de la célula en la matriz extracelular. Dicho con otras palabras, la existencia de un equilibrio entre las fuerzas proporcionaba un medio de integración mecánica y bioquímica en el plano molecular.



8. ENDURECIMIENTO LINEAL de una estructura de integridad tensional. Se produce ese fenómeno porque los miembros estructurales se autorreorientan hasta situarse en la dirección de la tensión aplicada (hacia abajo en la representación de la derecha).

Andrew Matus, del Instituto Friedrich Miescher de Basilea, añadió una importante nota a pie de página a ese cuadro explicativo. Tras lograr que las células construyeran microtúbulos fluorescentes, Matus observó el abombamiento de los microtúbulos por efecto de la compresión.

El modelo de integridad tensional sugiere que las estructuras del citoesqueleto pueden modificarse alterando el equilibrio entre las fuerzas transmitidas a través de la superficie celular. Se trata de una tesis crucial, habida cuenta de que muchas enzimas y otras sustancias que controlan la síntesis de proteínas, la conversión de energía y el crecimiento celular se hallan físicamente inmóviles sobre el citoesqueleto. Por este motivo, el cambio de la geometría y mecánica del citoesqueleto podría afectar a las reacciones bioquímicas e incluso modificar los genes activados y, por ende, las proteínas que ellos cifran.

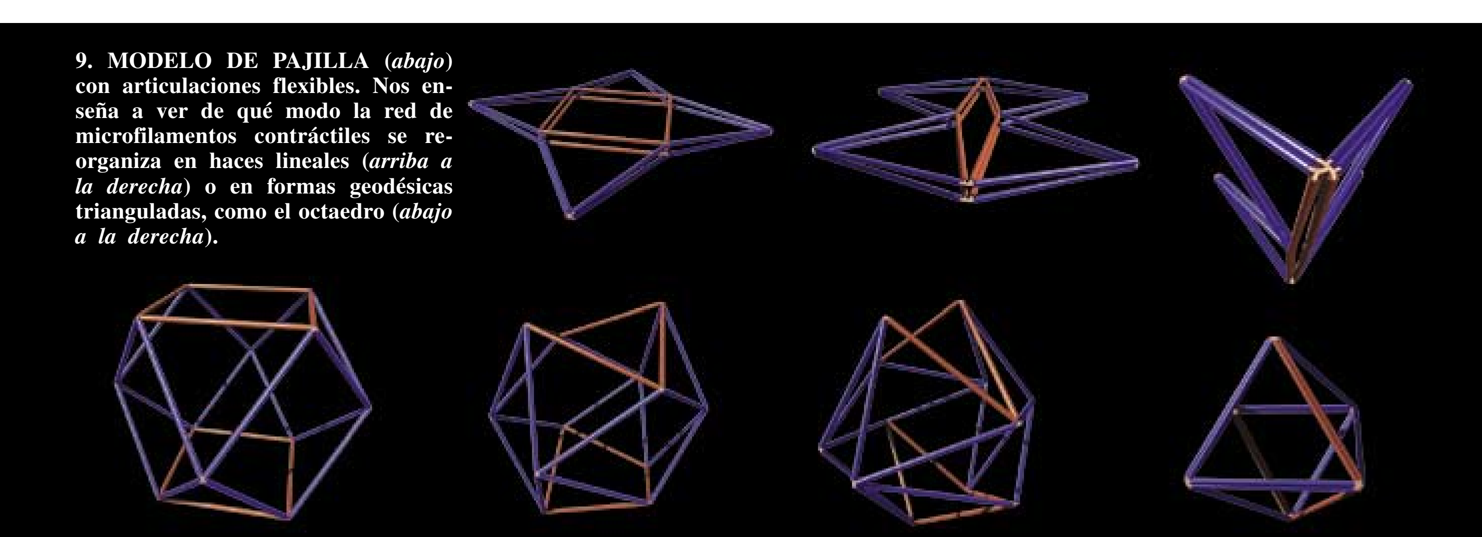
Para profundizar en esa posibilidad, Rahul Singhvi y Christopher S. Chen, de mi grupo, en colaboración con George M. Whitesides, también en Harvard, desarrollaron un método para experimentar con la morfología y la función celular. Obligaron a las células vivas a adoptar formas diversas —esféricas, aplanadas, redondeadas o cuadradas— colocándolas en diminutos "islotes" adhesivos constituidos por matriz extracelular. Cada islote adhesivo estaba rodeado por una superficie parecida a teflón y a la que no podían adherirse las células.

Con una simple modificación de la morfología de la célula activaban o desactivaban diferentes programas vinculados a los genes. Al aplanarse, las células tendían a dividirse; por contra, las células esféricas a las que se impedía que se extendieran, ponían en marcha un programa de apoptosis, o muerte celular. Cuando las células no estaban ni demasiado extendidas ni demasiado retraídas, ni se dividían ni se morían. Pero sí se diferenciaban en un tejido específico: las células de capilares formaban tubos capilares huecos; los hepatocitos segregaban proteínas que el hígado suministra a la sangre, y así sucesivamente.

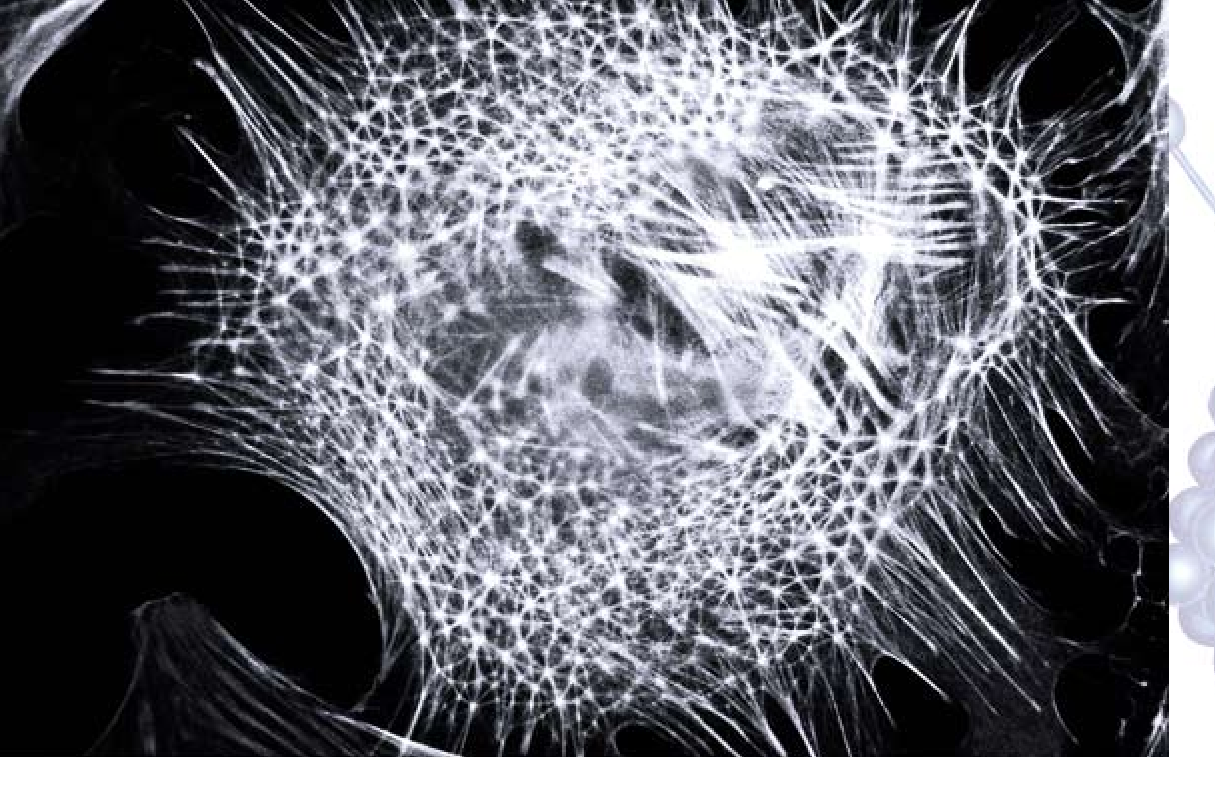
Veíase, pues, que la reestructuración mecánica de la célula y del citoesqueleto señalaba a la célula qué hacer. Las células muy aplanadas, con su citoesqueleto extendido, perciben una doble necesidad: que se requieren más células para tapizar el substrato circundante —como en la cicatrización de una herida— y que debe procederse a la división celular. La adopción de una forma esférica indica que hay demasiadas células en pugna por el espacio de la matriz y que está dándose una división excesiva. Tienen que morir algunas para evitar la formación de un tumor. Entre estos dos extremos se establece y mantiene la función normal del tejido. El esclarecimiento del mecanismo en virtud del cual se produce esa inactivación y bloqueo podría llevarnos a nuevos enfoques en el tratamiento del cáncer y en la reparación de tejidos, por no citar la creación de tejidos artificiales para trasplantes.

El siguiente nivel ascendente en la jerarquía del autoensamblaje es la formación de tejidos. Se desarrollan éstos a partir de uniones intercelulares y de células con la matriz extracelular. En los tejidos aparece una propiedad emergente, asociada a su comportamiento mecánico. Músculo, cartílago, vasos sanguíneos y piel son tejidos que presentan una respuesta llamada de endurecimiento lineal. Si se tira de la piel, por ejemplo, se nota que la resistencia aumenta cuando lo hacemos con mayor energía. Una fuerza externa creciente se encuentra con una resistencia creciente. La investigación reciente ha mostrado que hasta moléculas individuales, como la de ADN, presentan endurecimiento lineal. Sin embargo, hasta que acometimos el estudio de ese fenómeno en el marco de la integridad tensional, nadie había ofrecido una explicación mecánica o matemática del mismo.

En 1993, Ning Wang, de mi grupo, desarrolló en colaboración con James P. Butler, de la Escuela de



9. MODELO DE PAJILLA (*abajo*) con articulaciones flexibles. Nos enseña a ver de qué modo la red de microfilamentos contráctiles se reorganiza en haces lineales (*arriba a la derecha*) o en formas geodésicas trianguladas, como el octaedro (*abajo a la derecha*).



10. ENCONTRAMOS FORMAS geodésicas en un sinfín de estructuras naturales. Por ejemplo, en una sección del citoesqueleto de una célula de mamífero (*arriba a la izquierda*), un adenovirus (*arriba en el centro*), un grano de polen (*en el sentido de las agujas del reloj desde abajo a la derecha*), una buckybola con un ion potasio en el centro, un complejo enzimático y un espécimen de *Volvox globator*, organismo multicelular.

Salud Pública de Harvard, un instrumento que nos ha permitido retorcer incluso moléculas de la superficie de la membrana celular y medir simultáneamente la respuesta de la célula. Al aumentar la tensión aplicada sobre las integrinas (moléculas que atraviesan la membrana celular y unen la matriz extracelular al citoesqueleto interno), las células responden con un endurecimiento cada vez mayor, igual que lo conocido con los tejidos. Además, las células adquieren mayor rigidez o flexibilidad según se modifique la fuerza aplicada sobre el citoesqueleto, cambiando, por ejemplo, la tensión en los microfilamentos contráctiles.

Aunque desconocemos los pormenores de la interacción, hemos demostrado, mediante un modelo de integridad tensional construido con varillas e hilos elásticos, que la respuesta puede columbrarse si nos fijamos en la reacción de las estructuras de integridad tensional ante la fuerza de la tracción. A grandes rasgos, todos los elementos estructurales interconectados se reorganizan en respuesta a la presión o tracción local. El endurecimiento lineal se produce porque, conforme aumenta la tensión aplicada, crece el número de elementos estructurales que se orientan en la dirección de la tensión aplicada.

En colaboración con Dimitrije Stamenovic, de la Universidad de Boston, hemos desarrollado un modelo matemático fundado en esos principios. Predice la respuesta de endurecimiento de los tejidos, células e incluso moléculas. Esperamos servirnos del modelo para preparar materiales dotados de endurecimiento lineal y aptos para su aplicación en ropas protectoras y miembros artificiales. Este mismo enfoque matemático podría incorporarse en programas de ordenador, lo que prestaría un valioso apoyo a la modelización molecular y el diseño de fármacos.

En los estudios de cambios inducidos por magnetismo realizados por Wang y en los experimentos de tracción con micropipetas de Manioti, hemos observado que las tensiones aplicadas sobre los receptores de superficie celular implicados en el metabolismo —más que en la adhesión— no se transmitían eficazmente al interior de la célula. Antes bien, las fuerzas mecánicas llegaban al interior celular a través de vías moleculares específicas; esa observación arrojó nueva luz sobre la forma como las células perciben los estímulos mecánicos que regulan el desarrollo de los tejidos. Esa nueva perspectiva podría iluminar el trasfondo de una amplia gama de fenómenos, desde el desarrollo muscular en respuesta a la tensión hasta el crecimiento de raíces de la plantas en respuesta a la gravedad.

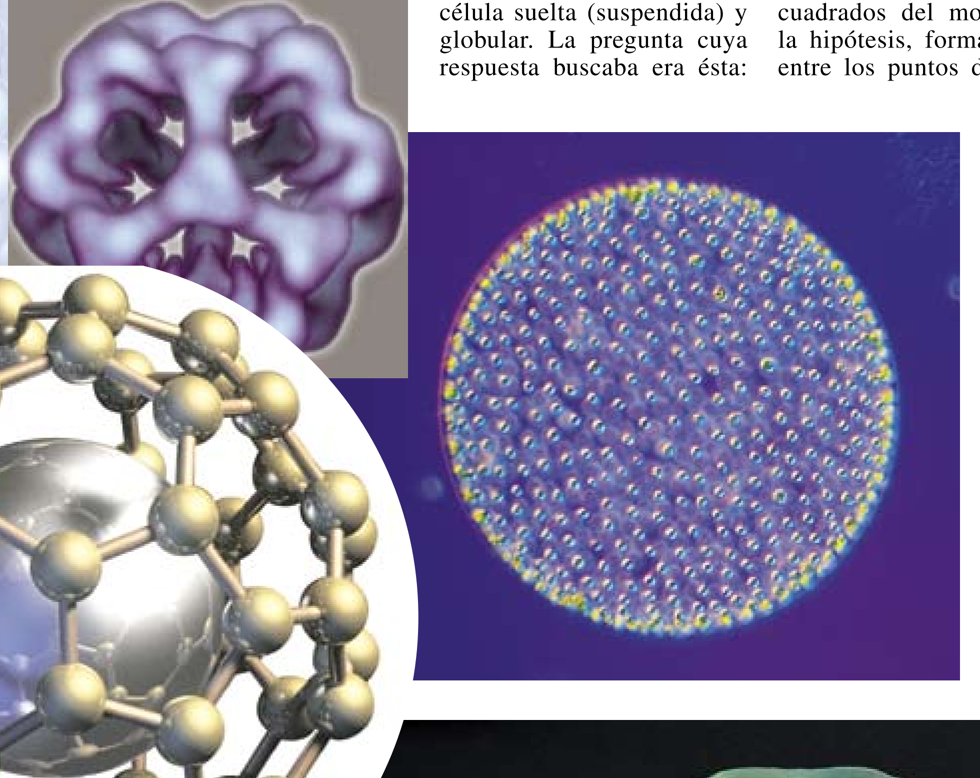
Aunque los modelos de integridad tensional predicen en buena parte el funcionamiento de las células, hay un desajuste que merece explicación. Muchas células pueden extenderse y aplanarse sin microtúbulos, los puntales principales del modelo. Si las células pueden cambiar de globulares a aplanadas sin necesidad de estos puntales, ¿como aplicarles el modelo de integridad tensional? De nuevo, el recurso a una técnica sencilla de modelización me trajo una inesperada sorpresa: la propia red de microfilamentos constituía una estructura de integridad tensional.

En el citoesqueleto de una célula, los microfilamentos contráctiles tejen un reticulado que se reorganiza localmente en formas distintas, por ejemplo, en haces alargados o en redes de triángulos. Para explorar el mecanismo de esta reorganización, construí un modelo de reticulado de microfilamentos: una estructura poliédrica hecha con pajillas que contenía seis triángulos y cuatro cuadrados. Las pajillas se mantenían unidas por

una banda elástica que había hecho pasar a través de las pajillas y até a sí misma. Cada pajilla representaba un microfilamento contráctil que podía generar tensión al contraerse. Sabido es que los microfilamentos se tornan más rígidos cuando se contraen. Así, el hilo elástico del modelo venía a remedar la tensión continua en la estructura completa que resulta del acortamiento de todos los filamentos que se han hecho más rígidos.

El modelo de pajillas se proponía representar una unidad citoesquelética modular interconectada en todas direcciones con otros módulos semejantes en una célula suelta (suspendida) y globular. La pregunta cuya respuesta buscaba era ésta: ¿qué sucedería a semejante estructura si la célula que sustentaba se uniera a una superficie rígida?

Las células se adhieren a la matriz extracelular mediante moléculas de superficie. Pero las células no se pegan a la matriz de una manera uniforme, sino que establecen "soldaduras locales" en determinados puntos, en las llamadas adhesiones focales. Los microfilamentos contráctiles responden a este anclaje estrechándose e incrementando la tensión isométrica dentro del retículo. Los modelos de pajillas sugerían que el aumento de tensión resultante de la unión provocaría el autoensamblaje de los microfilamentos contráctiles que formaban los cuadrados del modelo. Ese autoensamblaje, a tenor de la hipótesis, formaría haces lineales, que se extenderían entre los puntos de adhesión focal donde los receptores de integrina se anclan en la matriz. En efecto, cuando las células se extienden sobre una superficie, los microfilamentos contráctiles se alinean de manera casi idéntica para formar haces o fibras de tensión.



Lo expuesto contrasta con lo que sucede en la parte superior de la célula. Allí no hay substrato adherente que resista la tracción de los microfilamentos que se encogen. En esas regiones la contracción de cada filamento sólo pueden soportarla la tracción y la rigidez de los filamentos vecinos. Fuller demostró hace ya muchos años que la tracción y torsión hacia dentro determinan que este tipo de estructura poliédrica experimente una transformación agitada: el tinglado, sumamente flexible, de cuadrados y triángulos se converti-



11. LA INTEGRIDAD TENSIONAL está presente en voladizos que incluyen estructuras como el cuello (músculos y hueso) de una jirafa y una escultura de Kenneth Snelson hecha de vigas y cables.

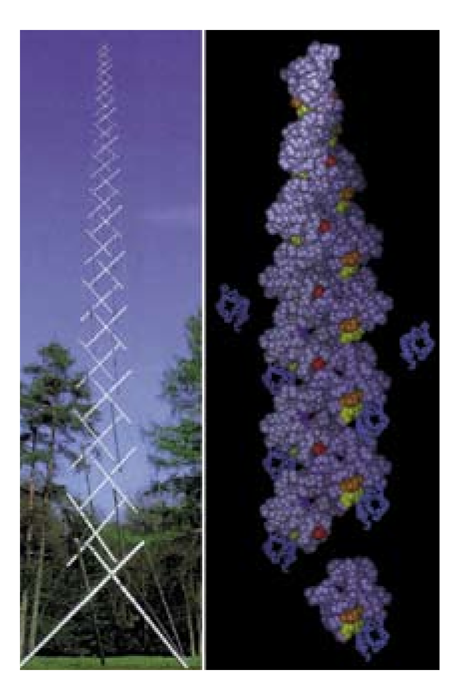
ría en octaedros o tetraedros; dicho de otro modo, en modelos de integridad tensional triangulares.

Cuando puse en conexión varios modelos semejantes de pajillas, observé que uno a uno se iban contrayendo progresivamente y engendraban una estructura geodésica compuesta por octaedros y tetraedros, alternantes y densamente compactos. En una célula real, la contracción de las redes de microfilamentos circundantes que conectan con la base de la célula combaría el tinglado en cuestión hacia el núcleo esférico, transformándolo en una cúpula triangulada, en una cúpula geodésica.

Elias Lazarides, a la sazón en el Laboratorio Cold Spring Harbor de Nueva York, y Mary Osborn y Klaus Weber, del Instituto Max Planck de Gotinga, observaron esas mismas transformaciones en la región del citoplasma por encima del núcleo, en las células extendidas. La existencia de una cúpula geodésica dentro del citoesqueleto molecular demuestra de manera palmaria que las células pueden y hacen uso de la arquitectura de la integridad tensional para configurar su citoesqueleto.

La estructura geodésica descubierta en el seno del citoesqueleto constituye un ejemplo típico de un patrón que abunda en diversas escalas de la naturaleza. Buckminsterfullerenos (agrupaciones esféricas de átomos de carbono), virus, enzimas, orgánulos, células e incluso pequeños organismos exhiben formas geodésicas. Por eso, llama la atención el exiguo número de científicos que se hayan preguntado por ese fenómeno. En mi opinión, esa pauta iterada refleja la existencia de reglas comunes de autoensamblaje. En particular, estas estructuras se autoestabilizan en las tres dimensiones de una manera semejante: disponen sus componentes de suerte tal que ahorren máxima energía y masa a través de una tensión ininterrumpida y una compresión local, es decir, según el modelo de integridad tensional.

El ensamblaje de un virus, la forma inferior de vida sobre la tierra, implica una serie de interacciones entre proteínas similares que convergen para constituir juntas una cubierta geodésica en cuyo interior se aloja el material genético. Durante el proceso de formación del virus, las prolongaciones lineales de las proteínas se solapan con colas semejantes de proteínas vecinas y engendran una estructura geodésica, triangulada y nanométrica. En ese andamiaje, cada unión se autoestabiliza merced al equilibrio resultante entre la tracción de las fuerzas intermoleculares (puentes de hidrógeno) y la capacidad de las colas de las distintas proteínas para resistir la compresión y el abarquillamiento.



12. INTEGRIDAD TENSIONAL vertical de una escultura y un modelo de microfilamento de citoesqueleto (*arriba*). La resistencia de estas estructuras deriva del mismo principio: se autoestabilizan gracias a un equilibrio entre compresión y tensión. En el tejido superficial del ojo de una mosca (*fondo a la derecha*), las células adoptan una disposición geodésica para el mismo propósito: aportar estabilidad mediante una tensión ininterrumpida y una compresión local.

Ese esquema básico vuelve a repetirse en las buckybolas, salvo que los átomos de carbono, y no las proteínas, son aquí los bloques constituyentes. En las buckybolas, 60 átomos de carbono forman una esfera geodésica cubierta por 20 hexágonos con 12 pentágonos intercalados, algo muy parecido a un balón de fútbol. En efecto, los noventa enlaces carbono-carbono son los puntales de una esfera de integridad tensional.

Sin embargo, cuesta más advertir que esas mismas reglas de construcción se aplican también a estructuras irregulares, incluidas muchas biomoléculas, que no presentan formas geodésicas. Las proteínas, de las que dependen la estructura, catálisis y otras funciones celulares, son largas hileras de aminoácidos. Secciones del esqueleto peptídico, resultante de las uniones aminoacídicas, se pliegan en configuraciones helicoidales que se autoestabilizan gracias al equilibrio entre las fuerzas de atracción de los puentes de hidrógeno (que provocan el acercamiento entre diferentes regiones de la molécula) y la capacidad



de la hélice proteica para resistir el encogimiento, o la compresión. En otras palabras, estas regiones helicoidales se autoestabilizan por integridad tensional, igual que lo hace el ADN o cualquier otra molécula helicoidal.

La organización proteica requiere también un ensamblaje jerárquico. Las secciones breves de proteína que adquieren rigidez por la formación de la hélice están separadas de otras regiones por intermedio de segmentos del esqueleto peptídico que actúan a modo de bisagras. Estas regiones más lineales se pliegan sobre sí mismas (a causa de las fuerzas tensoras de los puentes de hidrógeno) para estabilizar la molécula. Las hélices rígidas pueden estar muy comprimidas en determinados puntos, lo que no obsta para que las fuerzas estén equilibradas en el conjunto de la molécula pretensada.

Una fuerza local puede cambiar la morfología de la estructura de integridad tensional. Por eso, la unión de una molécula a una proteína puede provocar que las zonas rígidas helicoidales se reorganicen de manera diferente en la proteína en cuestión. Por ejemplo, cuando una molécula portadora de una señal se une a un receptor que atraviesa la membrana para penetrar en el interior de la célula, ese engarce puede inducir un cambio conformacional en el extremo opuesto del receptor. Estos cambios conformacionales alteran, a su vez, la morfología de las proteínas adyacentes y disparan una cascada de reestructuración molecular en el interior de la célula. No de otra manera perciben las células los cambios que se producen en el entorno y reaccionan en consecuencia.

Por tanto, en la gama que va de la molécula al tejido humano, el modelo de integridad tensional es el sistema preferido por la naturaleza para sus construcciones. Sólo la integridad tensional puede explicar cómo movemos un brazo, la piel se estira, se extiende la matriz extracelular, las células se distorsionan y las moléculas interconectadas que forman el armazón interno de la célula perciben el tirón; y todo ello, sin rotura ni discontinuidad.

A mayor abundamiento, la integridad tensional podría servir para dar razón de la exquisita coordinación de estos fenómenos en los organismos. En la Universidad Johns Hopkins, Donald S. Coffey y Kenneth J. Pienta descubrieron que las estructuras que respondían al modelo de integridad tensional operaban a manera de osciladores armónicos. El ADN, los núcleos, los filamentos del citoesqueleto, los canales iónicos de membranas, células y tejidos presentan frecuencias de vibración resonantes características. La transmisión de la tensión a través de una cadena de integridad tensional proporciona un medio que permite distribuir fuerzas entre todos los componentes interconectados y, al mismo tiempo, acoplar, o "sintonizar" mecánicamente el sistema en su conjunto.

Los cambios que experimenta el ADN generan diversidad biológica. Pero los genes son un producto de la evolución, no su fuerza motriz. Y así encontramos que, mucho antes de que apareciera el ADN, en el mundo inorgánico de cristales y minerales había formas geodésicas semejantes a las halladas en virus, enzimas y células. Las propias moléculas de agua despliegan una estructura geodésica.

Por tanto, la cuestión fundamental será la siguiente: ¿de qué forma surgieron las moléculas orgánicas y evolucionaron las células a partir de compuestos inorgánicos? Después de todo, en el marco explicativo de las propiedades emergentes el autoensamblaje de moléculas en orgánulos, o de células en tejidos, no difiere mucho del autoensamblaje. De la combinación del sodio, un metal explosivo, y del cloro, un gas tóxico, se tiene cloruro sódico, con una propiedad emergente curiosa menos agresiva, la de servir de condimento. Aquí el principio importante es el mecanismo en cuya virtud una estructura se autoconforma y mantiene juntos sus componentes en el espacio tridimensional. Esa característica es lo que define el modo en que la estructura en cuestión se comportará como un todo unitario.

En un sentido más amplio, toda la materia se halla sujeta a las mismas restricciones espaciales, al margen de la escala o posición. Consideradas, pues, tales limitaciones, hemos de aceptar que la integridad tensional es la manera de construir más económica y eficiente en el intervalo que va de lo molecular a lo macroscópico. Entra en lo posible que la selección haya primado estructuras de integridad tensional enteramente trianguladas debido a su alto grado de eficiencia, de tenaz resistencia mecánica con un mínimo de materiales. La flexibilidad que presentan las estructuras pretensadas de integridad tensional ofrecería la ventaja de que podrían éstas adoptar configuraciones diversas. Si una molécula o célula fuera capaz de cambiar de una forma a otra más estable a una determinada temperatura o presión, o se tornara más eficiente desde el punto de vista metabólico, la duración de su vida se alargaría. Habría sido más probable la interacción con otras entidades semejantes y permitir entonces un nuevo autoensamblaje.

Se cree que la evolución comenzó no tanto en un caldo primordial cuanto en capas de arcilla. No deja de resultar curioso que la arcilla sea una red porosa de átomos dispuestos geodésicamente dentro de formas octaédricas y tetraédricas. Pero al no estar estos octae-

DONALD E. INGBER, doctor en medicina y doctor en ciencias por la Universidad de Yale, enseña patología en Harvard. Colabora, asimismo, en el centro de bioingeniería del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Investigador de la estructura celular, ha contribuido al estudio de la angiogénesis de tumores; suyo es también el descubrimiento de un fármaco anticanceroso que se halla en fase de prueba clínica.

dros y tetraedros muy empaquetados retienen la capacidad de moverse y deslizarse entre sí. Merced a tal flexibilidad la arcilla cataliza muchas reacciones químicas, incluidas las que pudieron haber producido los primeros eslabones moleculares de la vida orgánica.

Con el transcurso del tiempo, las distintas asociaciones moleculares se habrían autoensamblado para crear ya estructuras con funciones especializadas —precursoras de los orgánulos actuales— que se combinarían entre sí para originar las primeras células elementales. Estas sintetizarían entonces proteínas, que se autoensamblarían para formar los andamios de matriz extracelular, lugares de anclaje que, a su vez, impulsarían el autoensamblaje de tejidos. De este autoensamblaje hístico surgirían los órganos. Mediante combinación y remodelación progresiva de diferentes órganos se constituirían organismos complejos. ¿Qué otra cosa es el desarrollo de un embrión a partir de un óvulo y un espermatozoide sino recapitulación de todas esas etapas de autoensamblaje?

Con la aparición del ADN y de los genes advino un nuevo mecanismo para producir diversidad estructural, que aceleró la evolución. No obstante, durante todo ese período las reglas subyacentes bajo el proceso de autoensamblaje jerárquico permanecieron inalteradas. Por eso no cabe sorpresa alguna ante el hecho de que la disposición de huesos y músculos de *Tyrannosaurus rex* no difiera, en líneas esenciales, de la que presenta *Homo sapiens*, ni cabe ante la comprobación de que animales y plantas basen en el pretensado la estabilidad mecánica de su propia estructura corporal, ni ante el descubrimiento de que las formas geodésicas predominen en los sistemas naturales.

Asoman, por último, las cuestiones de corte filosófico. ¿Son universales estos principios constructivos? ¿Son aplicables a estructuras moldeadas con fuerzas de todo tipo de escalas? No lo sabemos. Snelson, sin embargo, ha propuesto un curioso modelo de átomo basado en la integridad tensional partiendo de las ideas de Louis de Broglie en 1923. El mismo Fuller se imaginó el sistema solar como una estructura compuesta por múltiples anillos indeformables de movimiento planetario y mantenidos en asociación por una tensión gravitatoria continua. A tenor de ese cuadro escénico nos llena de asombro también el oír que nuestro universo en expansión posea gigantescos filamentos de galaxias enlazadas por gravitación y agujeros negros aislados que experimentan localmente inmensas fuerzas de compresión. Tal vez sea ésta la única música de fondo de la naturaleza. Como sugirió a comienzos del siglo XX el zoólogo escocés D'Arcy W. Thompson, citando a Galileo, quien, a su vez, recogía el pensamiento de Platón, el libro de la naturaleza está escrito en el lenguaje de la geometría.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ON GROWTH AND FORM. Edición corregida. D'Arcy W. Thompson. Cambridge University Press, 1942 (reimpreso en 1992).

MOVEMENT AND SELF-CONTROL IN PROTEIN ASSEMBLIES. Donald L. D. Caspar en *Biophysical Journal*, vol. 32, n.º 1, págs. 103-138; octubre de 1980.

CLAY MINERALS AND THE ORIGIN OF LIFE. Obra dirigida por A. Graham Cairns-Smith y Hyman Hartman. Cambridge University Press, 1986.

CELLULAR TENSEGRITY: DEFINING NEW RULES OF BIOLOGICAL DESIGN THAT GOVERN THE CYTOSKELETON. Donald E. Ingber en *Journal of Cell Science*, vol. 104, n.º 3, págs. 613-627; marzo de 1993.

MECHANOTRANSDUCTION ACROSS THE CELL SURFACE AND THROUGH THE CYTOSKELETON. Ning Wang, James P. Butler y Donald E. Ingber en *Science*, vol. 260, págs. 1124-1127; 21 de mayo de 1993.

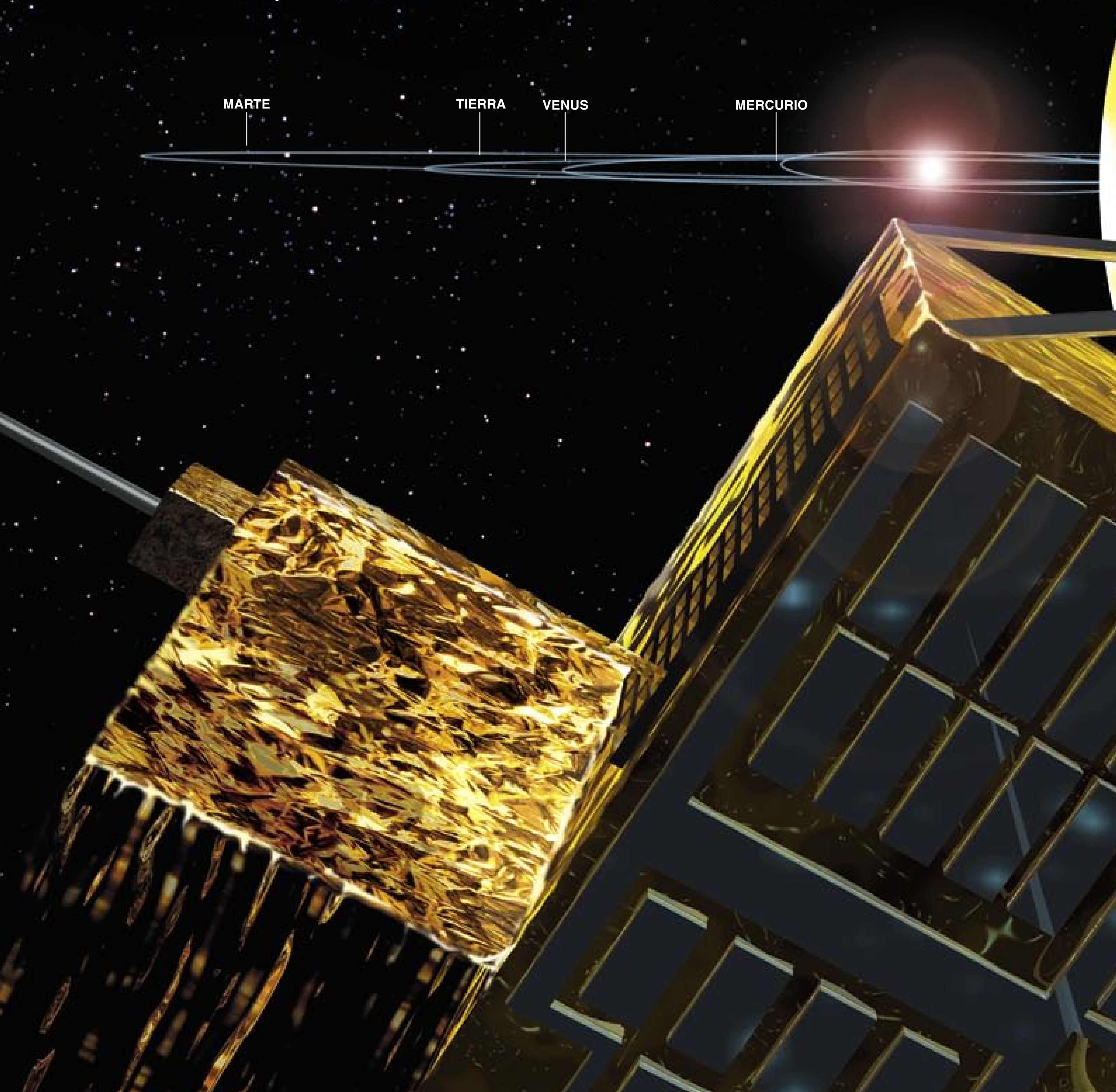
GEOMETRIC CONTROL OF CELL LIFE AND DEATH. Christopher S. Chen, Milan Mrksich, Sui Huang, George M. Whitesides y Donald E. Ingber en *Science*, vol. 276, págs. 1425-1428; 30 de mayo de 1997.

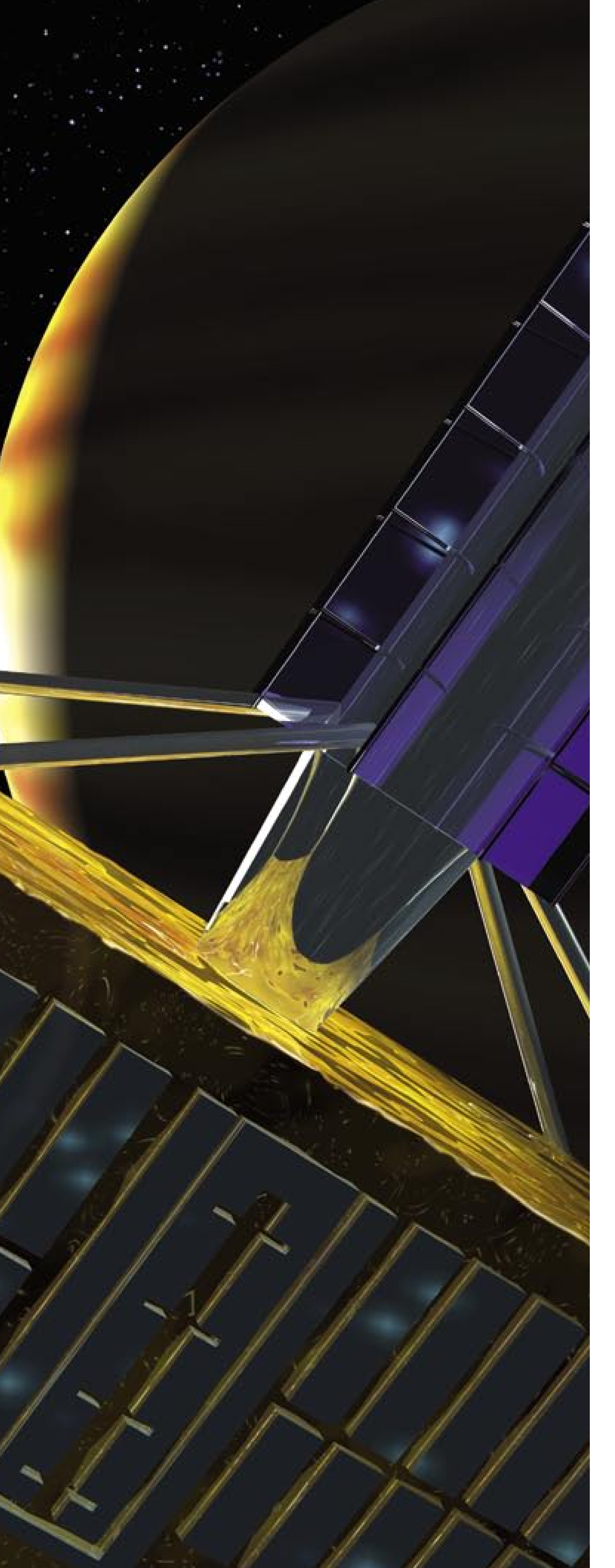
TENSEGRITY: THE ARCHITECTURAL BASIS OF CELLULAR MECHANOTRANSDUCTION. Donald E. Ingber en *Annual Review of Physiology*, vol. 59, págs 575-599; 1997.

La misión Ulises

La primera sonda espacial que sigue una trayectoria "polar" realiza descubrimientos sorprendentes en su vuelta alrededor del Sol

Edward J. Smith y Richard G. Marsden





Aunque los exploradores llevaban 500 años viajando alrededor del mundo, hubo que esperar al siglo XX para que unos pocos intrépidos recorrieran los inmensos parajes, helados, del Artico y el Antártico, camino de ambos polos. Es curioso que la exploración del sistema solar haya seguido una historia paralela. En estos últimos cuarenta años las sondas científicas enviadas al espacio se han separado poco del plano ecuatorial del Sol, donde describen sus órbitas la Tierra y los planetas. Pero no hace mucho la sonda Ulises se aventuró más allá de esa angosta zona y se adentró en las "regiones polares" del espacio interplanetario.

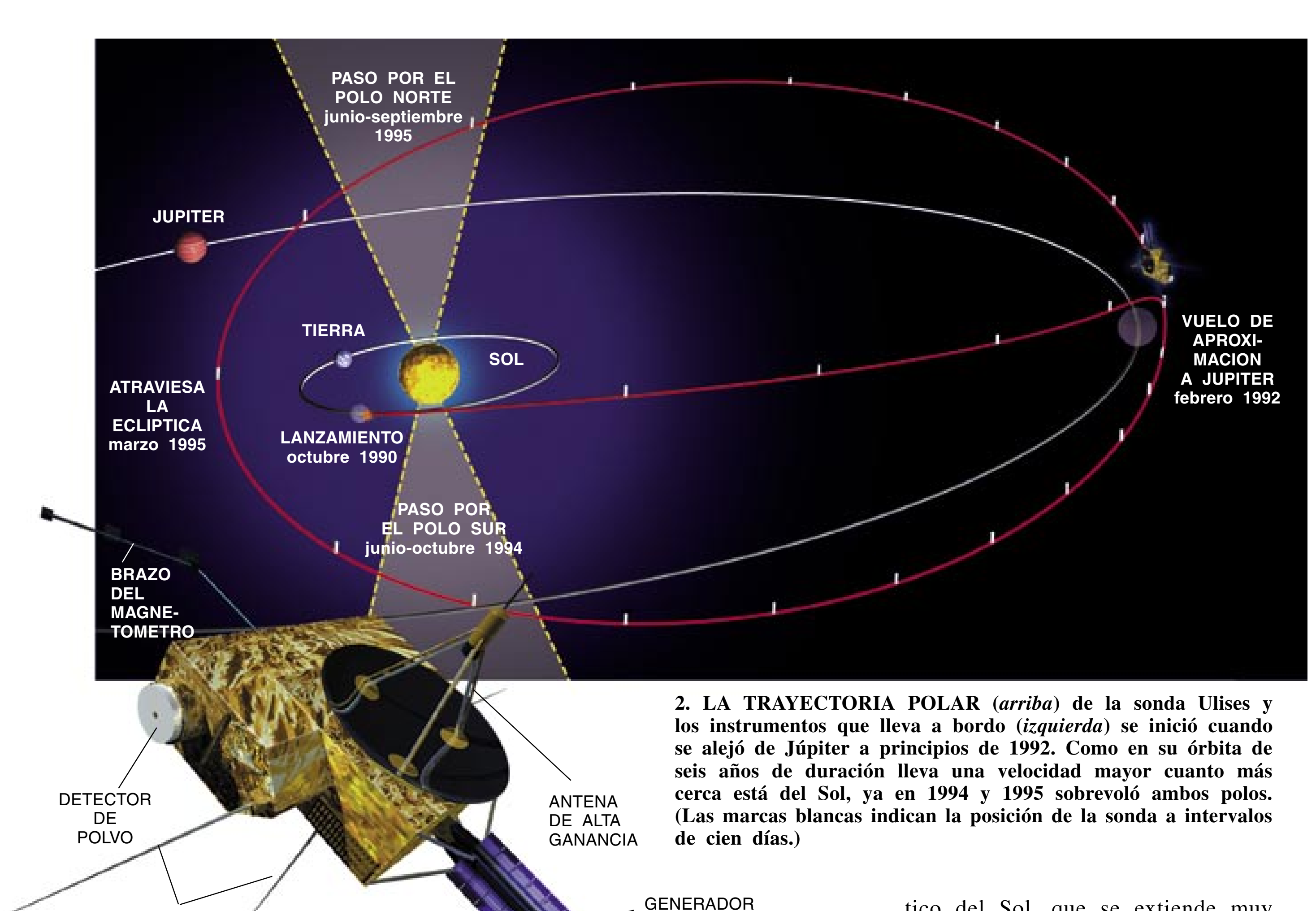
Las razones que explican esa tardanza se esconden detrás de los caprichos de la investigación espacial, sin nada que ver con una falta de atención. Los astrónomos no habían dejado de soñar en un viaje como éste. Desde hace años se sabe que el Sol está rodeado de una atmósfera externa diáfana (la corona solar) que se extiende más allá de la órbita de la Tierra; también, que los gases de las colas de los cometas apuntan siempre en dirección opuesta al Sol porque una rápida corriente que fluye hacia fuera de la corona, el viento solar, las arrastra. Pero es muy reciente nuestro conocimiento del modo en que el material que emana del entorno de los polos solares atraviesa la inmensidad interplanetaria.

El viento solar ejerce efectos poderosos. De no existir, los restos que vagan por el espacio interestelar —gas, polvo, campos magnéticos y partículas sueltas— irían a la deriva, entre los planetas, hacia el Sol. El viento solar limpia el espacio de estos despojos interestelares y los lleva mucho más allá de la órbita de los planetas exteriores. Pero hasta hace poco la heliosfera, la inmensa región creada de esa manera, seguía inexplorada en buena parte. Se sabía muy poco de las zonas situadas a altas latitudes de esta burbuja donde se ejerce la influencia solar.

Por tanto, el envío de una sonda allende el plano de la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol (la eclíptica) estaba más que justificado; los medios, sin embargo, no se veían tan claros. Para salir de la eclíptica una nave espacial ha de perder el momento que recibe de su plataforma de lanzamiento, la Tierra, que viaja alrededor del Sol a una velocidad de 30 kilómetros por segundo. Ante semejante velocidad inicial, ni los cohetes más potentes de los que se dispone podrían poner directamente una sonda en una órbita que sobrevolara los polos del Sol. El único modo de lograrlo era hacer que su trayectoria se doblara en torno a un planeta mayor, Júpiter por ejemplo, de forma que la maniobra anulara el exceso de momento heredado de la Tierra e impulsara la nave a una órbita inclinada con respecto a la eclíptica.

Al principio lo que más preocupaba era que los cinturones de radiación que circundan a Júpiter hicieran inviable esa maniobra, ya que podrían dañar los delicados aparatos electrónicos instalados a bordo

1. GRACIAS A SU ENCUENTRO con Júpiter la sonda Ulises perdió el momento angular que había heredado de la Tierra. Su trayectoria de ida y vuelta en torno al gigante gaseoso envió a la sonda en dirección "sur", fuera de los planos de los planetas, y la llevó a una órbita muy inclinada alrededor del Sol.



2. LA TRAYECTORIA POLAR (*arriba*) de la sonda Ulises y los instrumentos que lleva a bordo (*izquierda*) se inició cuando se alejó de Júpiter a principios de 1992. Como en su órbita de seis años de duración lleva una velocidad mayor cuanto más cerca está del Sol, ya en 1994 y 1995 sobrevoló ambos polos. (Las marcas blancas indican la posición de la sonda a intervalos de cien días.)

de las sondas interplanetarias. Pero dos naves —Pioneer 10 y 11— sobrevolaron Júpiter a comienzos de los setenta y demostraron que era posible capear esos temporales de partículas energéticas. Su éxito abrió el camino a una misión polar alrededor del Sol, a la que más tarde se bautizaría Ulises en honor al guerrero de la mitología griega que se adentró en territorios inexplorados.

Pese a que la NASA y la ESA (Agencia Europea del Espacio) decidieron mancomunar esfuerzos en 1977 y realizar conjuntamente el proyecto, Ulises no despegó hasta 1990. El período de intervalo se dedicó al diseño, fabricación y comprobación de la nave, y a librar unas cuantas batallas secundarias. Hubo, por ejemplo, que enmendar el plan original de construir una nave europea y otra estadounidense. El coste desorbitado obligó a ceñirse a una sola sonda. Se encargó la ESA, pero el lanzamiento correspondería a la NASA. Los instrumentos serían tanto europeos como estadounidenses. En 1986 se produjo un revés desastroso y casi insalvable. Pocos meses antes de la fecha prevista de lanzamiento de Ulises el transbordador que debería haberlo efectuado, el *Challenger*, hizo explosión a poco de despegar. Aquella catástrofe mantuvo en los hangares, durante dos años, a todos los transbordadores. Se formó una larga lista de espera. Tras nueve años de preparativos, Ulises hubo de aguardar otros cuatro antes de iniciar su viaje.

Con anterioridad a la misión, las observaciones realizadas desde tierra (o en órbita) habían mostrado ya que el viento solar no mana de forma uniforme de todos los puntos del Sol. Muy por encima de su superficie, cerca del ecuador, se elevan unos rizos brillantes o flámulas (*streamers*), que son una de las fuentes más importantes del viento solar. Estas estructuras siguen el campo magnético del Sol, que se extiende muy por encima de la superficie con líneas de fuerza en bucle, que, por lo común, nacen en un hemisferio y acaban en el otro. Otra estructura notable de la corona, caracterizada por ausencia de materia visible, se denomina agujero coronario. Esos huecos pueden surgir en cualquier punto de la superficie solar, pero son más frecuentes en los casquetes polares: emiten torrentes de viento solar que se alejan del astro a una velocidad considerable.

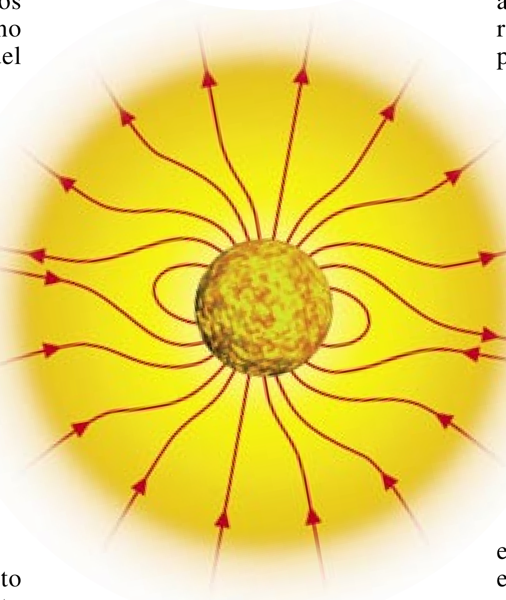
Las mediciones registradas por Ulises han ayudado a responder algunas de las preguntas clave sobre el viento solar. Tras circundar Júpiter y emprender su viaje hacia el "sur" se adentró en una región donde predominan los vientos de alta velocidad procedentes del agujero coronario del polo sur del Sol. Los instrumentos para el estudio del viento solar a bordo de Ulises detectaron un vendaval que soplaba a una velocidad constante igual a dos veces la velocidad promedio de los vientos más racheados de latitudes inferiores. Ocurrió que Ulises se encontró con este viento muy veloz mucho antes

de que llegara a la latitud del agujero coronario del sur del Sol, por lo que pudimos saber que el viento polar se expandía en cuanto abandonaba las inmediaciones del Sol.

No se esperaba una expansión tan mayúscula. La clave nos la dieron otras mediciones realizadas por la sonda. Se había medido antes indirectamente el campo magnético del Sol examinando la absorción de la luz de diferentes longitudes de onda por ciertos elementos de la atmósfera solar. A partir del desdoblamiento de las líneas espectrales que se producía, o efecto Zeeman, se vio que el campo magnético alrededor del Sol era muy parecido al que circunda a la Tierra: las líneas de fuerza magnética se concentran alrededor de dos polos magnéticos de polaridad opuesta, uno cerca del polo norte, el otro, del polo sur de rotación.

Se esperaba que Ulises observara que el campo magnético seguía a lo largo de su órbita un patrón similar. En cambio reveló que el flujo magnético que emana hacia el exterior presenta lejos del Sol aproximadamente la misma densidad a todas las latitudes. Se llegó a la conclusión de que la expansión del viento solar procedente del polo se debía a que las fuerzas magnéticas empujaban el viento hacia el ecuador, y así se diseminaban las líneas de flujo magnético y se hacían más uniformes.

El campo magnético y el viento solar van tan ligados porque el viento está compuesto por partículas cargadas. (La elevadísima temperatura de la corona solar —alrededor de un millón de kelvins— hace que los átomos neutros liberen electrones, de carga negativa, y creen así iones positivos.) Pero tanto la corona caliente como el viento solar que se desprende de ella son eléctricamente neutros porque tienen tantas cargas positivas de iones como negativas de electrones. Pese a su atracción mutua, los iones y los electrones del viento solar no se recombinan; la densidad de materia, bajísima, no facilita la posibilidad de que dos partículas se unan de nuevo. Estas partículas cargadas están sometidas a la influencia de los campos magnéticos: las cargas se aferran a las líneas de éstos y giran a su alrededor en órbitas muy apretadas. Pero el campo magnético también se ve afectado por las partículas cargadas del viento solar: el movimiento de éste empuja las líneas del campo y las balancea como si fueran bancos de algas a merced de las corrientes cambiantes del océano.



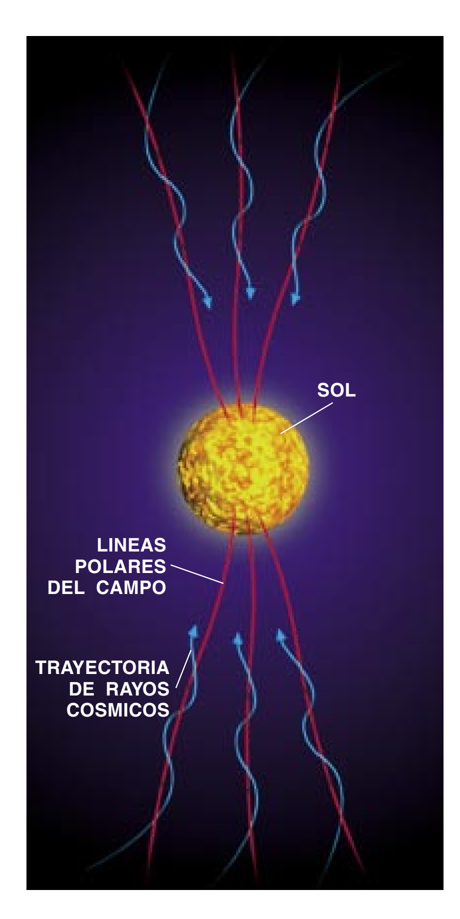
3. EL CAMPO MAGNETICO SOLAR, según la hipótesis aceptada antes del viaje de Ulises (*arriba*), concentraba las líneas de fuerza sobre los polos norte y sur del Sol. Pero las mediciones de la sonda durante su circumnavegación revelaron que las líneas del campo magnético están espaciadas de manera bastante uniforme sea cual sea la latitud solar (*abajo*).

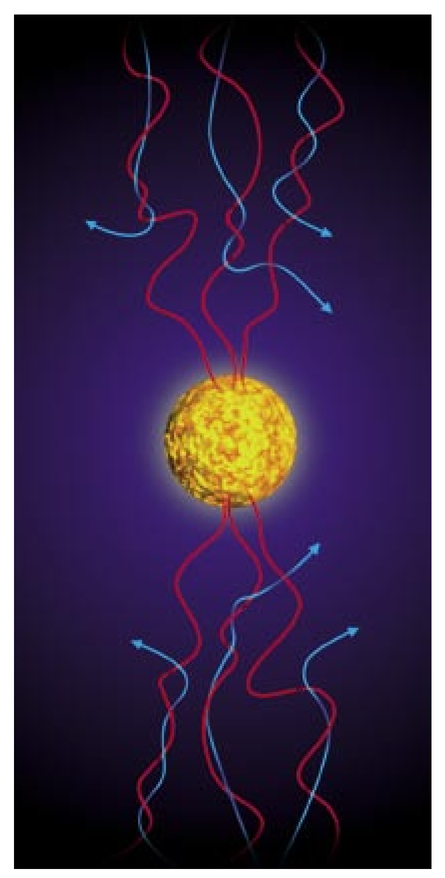
No todas las partículas cargadas del espacio interplanetario proceden del Sol. Las hay que son átomos desprovistos de electrones que, en algún lugar de la galaxia, se han acelerado hasta casi alcanzar la velocidad de la luz. Las de mayor energía, los rayos cósmicos penetrativos, pueden medirse en tierra una vez han bombardeado la atmósfera. Las primeras mediciones de los rayos cósmicos efectuadas con sondas espaciales, hace ya casi cuarenta años, mostraron que abundan, asimismo, otros rayos cósmicos con menos energía que los detectados cerca de la superficie de la Tierra. Se descubrió que el sistema solar estaba bañado en partículas de diverso tipo y procedentes, según parecía, de toda la galaxia.

Los investigadores no tardaron en percatarse de que la corriente del viento solar que sopla desde el astro hacia fuera impide a algunos rayos cósmicos acercársele. Sólo una pequeña fracción penetra en el interior de la heliosfera, donde, como salmones nadando contra corriente para desovar, han de superar obstáculos cada vez más difíciles. ¿Cuáles son exactamente las barreras que existen en el espacio vacío? Las bajas densidades de la materia garantizan que no habrá colisiones entre los rayos cósmicos y las partículas del viento solar. Pero al alejarse de la vecindad del Sol el viento solar se lleva consigo parte del campo magnético; los rayos que se dirigen al Sol están sometidos, pues, a las fuerzas que los campos magnéticos ejercen sobre toda partícula con carga eléctrica que se mueva.

Constreñidos por tales fuerzas, los rayos cósmicos rodean las líneas de campo magnético al tiempo que se desplazan en la dirección de éste; las partículas de los rayos pueden encontrarse además con ondas magnéticas que se propagan a lo largo de las líneas del campo cual se agita una bandera. Las ondas se oponen al flujo de partículas cargadas al hacer que la dirección del campo cambie bruscamente. Un rayo cósmico que se dirija al Sol es como el nadador que intenta adentrarse en el océano un día de fuerte oleaje.

Antes de la misión Ulises se suponía que los rayos cósmicos que viajaban hacia el Sol en dirección a los polos penetraban en la heliosfera con mayor facilidad que los que seguían rutas ecuatoriales. Existían dos razones principales para esa conjetura. Primero, debido a que las partículas cargadas siguen un camino





4. EL ACCESO de los rayos cósmicos a las regiones polares aumentaba, se creía, a causa de la mayor regularidad del campo magnético dominante allí (*izquierda*); gracias a ello, las partículas cargadas podían moverse hacia el interior a lo largo de las líneas de campo, mientras giraban a su alrededor. Pero Ulises descubrió que las líneas del campo magnético polar están en realidad plegadas y retorcidas (*derecha*). Estas irregularidades, cuyo tamaño es aproximadamente igual al radio del giro de una partícula, dificultan el flujo de rayos cósmicos hacia el Sol.

helicoidal a lo largo de las líneas de campo magnético, se esperaba que las líneas de fuerza más rectas y cortas que conectan los polos fueran pasillos excelentes hacia la parte interior de la heliosfera. Segundo, algunos investigadores creían que las ondas y otros cambios de la dirección del campo debían de ser mínimos porque el viento solar procedente de los agujeros coronarios polares fluye, comparado con el de otras regiones, de manera más regular.

EDWARD J. SMITH y RICHARD G. MARSDEN empezaron a trabajar para la misión Ulises hace más de veinte años. Smith se doctoró por la Universidad de California en Los Angeles en 1959 y dos años más tarde ingresó en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena, en cuya área de investigación espacial y terrestre trabaja ahora. Está especializado en la medición de los campos magnéticos y las ondas electromagnéticas del espacio. Marsden se doctoró en física en 1976 en el Colegio Imperial de Londres; ese mismo año empezó a trabajar para la misión Ulises como investigador de la Agencia Europea del Espacio. Su principal actividad investigadora se centra en los rayos cósmicos y otras partículas espaciales dotadas de gran energía.

Sin embargo, las mediciones realizadas por Ulises mostraron que los rayos cósmicos sólo eran algo más abundantes sobre los polos del Sol que sobre el ecuador. Unos aspectos imprevistos del campo magnético proporcionan de nuevo la explicación: Ulises encontró ondas que atravesaban el campo magnético polar oponiendo resistencia al paso de los rayos cósmicos hacia los casquetes polares. Estas perturbaciones pueden desviar la trayectoria de las partículas de los rayos cósmicos durante su viaje a través de la heliosfera. Para sorpresa de muchos científicos, Ulises mostró que el agitado campo magnético vuelve homogéneos los rayos cósmicos que llegan a la heliosfera interna con la misma eficacia que si se tratara de los ingredientes de un batido.

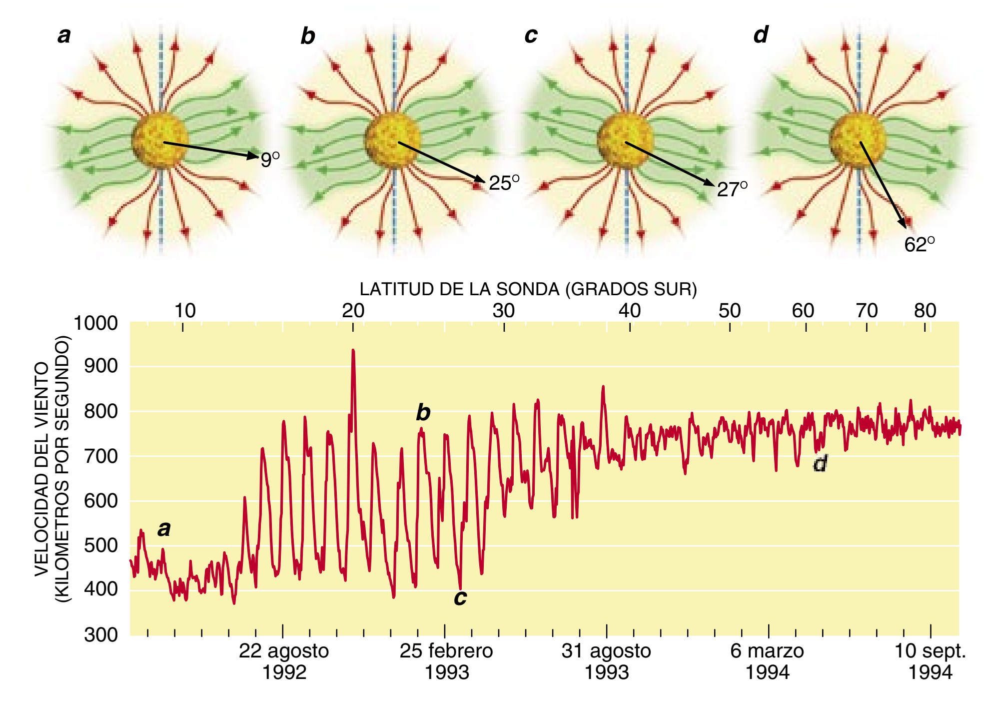
Aparte de los rayos cósmicos galácticos, hay varios tipos de partículas que se originan en el interior de la heliosfera y se desplazan a alta velocidad. Hablamos, con el lenguaje de los astrónomos, de las partículas solares energéticas. Aunque por su composición resultan similares a los iones del viento solar, estas partículas se mueven a velocidades muy superiores, demasiado deprisa para que su elevada energía se haya generado por simple calentamiento. Una posible explicación de estos iones de alta velocidad, o "partículas solares de gran energía", es que sufran un proceso de aceleración similar al que tiene lugar en los aceleradores de partículas del tipo ciclotrón. Las partículas cargadas inyectadas en el ciclotrón quedan dentro, atrapadas en un poderoso campo magnético alrededor del cual giran en espiral, mientras toman energía de un campo eléctrico oscilante.

La naturaleza, claro está, no actúa en todo de la misma forma que un producto de ingeniería como el ciclotrón. Los fuertes campos magnéticos y eléctricos sólo se producen en el espacio cuando se dan circunstancias particulares; por ejemplo, cuando un golpe de viento solar se encuentra de frente con unas corrientes más lentas. Se genera entonces un frente curvo de altas presiones, del cual nacen grandes ondas magnéticas que se propagan hacia delante y hacia atrás; esas ondas se empinan gradualmente (a la manera de olas que se acercan a la orilla) hasta convertirse en ondas de choque, superficies delgadas en las que se sabe que las propiedades del viento solar cambian bruscamente.

Las mediciones que nos llegaron de las sondas espaciales antes del viaje de Ulises demostraron que los frentes de choque aceleran las partículas hasta velocidades grandes. Esto explica por qué tienden a aparecer partículas de mucha energía por la Tierra con la regularidad de un reloj (generalmente dos veces en cada rotación solar). Debido a que el eje magnético del Sol está inclinado un poco hacia la eclíptica, el viento solar que se mueve lentamente desde cerca del ecuador del Sol alterna con el veloz que llega primero de uno de los casquetes polares y luego del otro; el proceso crea frentes de choque.

Durante su viaje a Júpiter Ulises detectó muchas veces concentraciones de partículas energéticas que acompañaban a esos complejos de ondas de choque. Pero cuando se alejó de las latitudes inferiores y llegó a la región donde predominaban los vientos rápidos procedentes de las zonas polares no encontró más frentes de choque porque la corriente estable del viento rápido impedía su formación. Sin embargo, resultó sorprendente que la sonda siguiese registrando erupciones de partículas de mucha energía a altas latitudes. Desconocemos el motivo de la regularidad con que semejantes partículas rápidas aparecen en regiones del espacio carentes de frentes de choque.

Hay otro tipo de partículas solares energéticas cuya razón de ser precisa un estudio más detallado. Cuando confluyen dos campos magnéticos de sentidos opuestos —fenómeno frecuente en los aledaños del Sol— se anulan; la energía que contenían pasa a las partículas cargadas próximas. La composición de algunas de las partículas de gran energía detectadas indica que, en efecto, provienen de la parte inferior de la atmósfera solar, donde es frecuente la aniquilación del campo. Falta por resolver cómo se produce exactamente la aceleración de estas partículas.



5. LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOLAR medida por Ulises varía con la latitud de la sonda (*flechas negras*) y la orientación de los polos magnéticos del Sol. Mientras Ulises permaneció en latitudes solares bajas (*a*), sólo encontró lentos vientos ecuatoriales (*verde*). A latitudes meridionales más altas detectó vientos polares rápidos (*amarillo*) cuando el polo magnético sur del Sol giraba hacia la sonda (*b*) y vientos lentos cuando se alejaba de ella (*c*). Cuando alcanzó una posición polar midió continuamente vientos rápidos (*d*).

Existe además otro tipo de partícula acelerada en el interior de la heliosfera. La composición de estas partículas rápidas difiere de la composición de otros tipos de rayos cósmicos de baja energía; por eso se las denominó rayos cósmicos anómalos. Su historia es insólita. Empiezan siendo átomos neutros de gas interestelar (generalmente helio, nitrógeno u oxígeno) que viajan hacia la heliosfera. No teniendo carga, atraviesan libremente las líneas del campo magnético, que impide la entrada en la heliosfera interior a muchas otras partículas. Pero los átomos que pasan cerca del Sol pueden ionizarse por efecto de la radiación solar o como consecuencia de raras colisiones con iones del viento solar.

Una vez ionizado, el átomo es inmediatamente capturado por el campo magnético circundante y se incorpora al flujo general de materia que se aleja del Sol. Ulises identificó numerosos tipos diferentes de estos "iones capturados". Estas observaciones y el mejor conocimiento de cómo evolucionan los iones capturados en el interior de la heliosfera deben revelar la abundancia en el espacio interestelar de los átomos progenitores, dato de especial interés.

Antes de la misión Ulises se creía que la aceleración que convertía los "iones capturados" en rayos cósmicos anómalos se circunscribía al llamado frente de choque terminal de la heliosfera, una frontera fija donde la rápida corriente centrífuga del viento solar disminuye su velocidad de forma brusca y se calienta. Pero Ulises demostró que los iones capturados se aceleraban también por frentes de choque viajeros en el interior del terminal.

El predominio de esos frentes de choque y de la mayoría de los fenómenos registrados por Ulises durante su primer vuelo polar por la heliosfera viene condicionado por el ciclo de once años de la actividad solar. Afortunadamente, el momento del lanzamiento y la trayectoria escogida llevaron a la sonda a sobrevolar ambos polos en 1994 y 1995, cuando el Sol atravesaba una fase de calma. Las condiciones reinantes en los casquetes polares del Sol eran, cabe presumir, las más simples. Pero cuando las sobrevuele de nuevo en los años 2000 y 2001, el Sol habrá alcanzado un nivel máximo de actividad.

El equipo de científicos que se encarga de Ulises está ansioso por verificar qué cambios se registrarán. La sonda sigue funcionando de forma óptima y las mediciones registradas llegan a la Tierra ininterrumpidamente a medida que gira alrededor del Sol. Y aunque ya se ha aprendido mucho, no es poco lo que todavía hay que descubrir acerca del Sol y la heliosfera mientras esta odisea científica continúe.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE HIGH LATITUDE HELIOSPHERE. Dirigido por R. G. Marsden. Kluwer Academic Publishers, 1995.

ULYSSES: SOLAR SOJOURNER. R.G. Marsden y E. J. Smith en *Sky and Telescope*, vol. 91, n.º 3, pág. 24-31; marzo de 1996.

Para obtener más información sobre la misión Ulises visite las siguientes direcciones de la WWW: http:// ulysses.jpl.nasa.gov/ y http://helio. estec. esa.nl/ulysses/welcome.html

La evolución de las tortugas

El reciente hallazgo de tortugas triásicas en Argentina, cuya antigüedad supera en 60 millones de años las más antiguas conocidas en Sudamérica, revela una diversidad ecológica y sistemática inesperada de los quelonios

Guillermo W. Rougier, Marcelo S. de la Fuente y Andrea B. Arcucci

Las tortugas, con su peto y espaldar característicos, son animales inconfundibles. Por esa misma singularidad su origen constituye también uno de los misterios más insondables de la paleontología de vertebrados.

Las tortugas son amniotas, lo mismo que lagartos, cocodrilos, aves y mamíferos actuales, además de un gran número de formas fósiles. Los amniotas presentan una membrana del huevo, el amnios, gracias a la cual evitan la pérdida de agua. La adquisición de esa estructura permitió a los amniotas la conquista de casi todos los ambientes terrestres, pues a diferencia de los anfibios no debían retornar al agua para desovar.

Este salto evolutivo aconteció durante el Carbonífero, que se inició hace 322 millones de años y perduró unos treinta. Merced al amnios, asistimos durante el Pérmico (hace entre 290 y 245 millones de años) a una verdadera eclosión de nuevos grupos. Pese a que no se conocen restos pérmicos de tortugas, todos los taxones que se presumen vinculados a las tortugas proceden de ese período.

El hallazgo de nuevos fósiles y el desarrollo de una nueva teoría sistemática en el último tercio de siglo han obligado a una revisión general del origen de las tortugas y sus interrelaciones con los principales grupos de amniotas. En 1914, D. Watson, paleontólogo inglés, postuló que *Eunotosaurus africanus*, un pequeño amniota del Pérmico medio de Africa del Sur (que vivió hace unos 260 millones de años), estaba relacionado con el origen de las tortugas. Cincuenta años más tarde todavía aceptaba esa hipótesis con reservas Alfred Romer, de la Universidad de Harvard. Las supuestas afinidades de *Eunotosaurus* con las tortugas eran avaladas por el ensanchamiento y espesamiento de las costillas torácicas (fenómeno de paquistosis) que semejan un rudimentario caparazón. Tales caracteres, sin embargo, no se aprecian en las tortugas triásicas primitivas.

Eunotosaurus presenta verdaderos dientes en los premaxilares y maxilares, carece de coraza dérmica y las cinturas escapulares se disponen externamente sobre las costillas, como en la mayoría de los amniotas. Pero esos rasgos morfológicos no se encuentran en las tortugas. En particular, éstas son los únicos vertebrados que poseen escápula interna, por debajo de las costillas y el caparazón.

La revisión de ejemplares ya descritos y el estudio de otros nuevos, incluido un cráneo completo de *Eunotosaurus africanus*, llevaron a B. Cox, en 1969, y A. Keyser y C. Gow, en 1981, a considerar a este taxón como un captorhinido muy especializado, sin relaciones claras con las tortugas. Los Captorhinidae son un grupo de amniotas primitivos, de aspecto semejante a un lagarto.

No obstante, el argumento más sólido contra la vinculación de *Eunotosaurus* con las tortugas se apoya en las costillas y espinas neurales, cuyo espesamiento y ensanchamiento no



1. LA FORMACION Los Colorados tiene extensos afloramientos de 100 km de longitud por 30 km de ancho. Abarca parte de la provincia de La Rioja para penetrar en la vecina provincia de San Juan. Constituye una unidad con 730 metros de espesor en algunas secciones, que llega a los 1000 metros en ciertos puntos. Gran parte de esta enorme extensión está aún sin explorar. El sector superior de la formación Los Colorados (los últimos 170 m) ha brindado casi todos los vertebrados fósiles colectados.

GUILLERMO WALTER ROUGIER, MARCELO SAUL DE LA FUENTE y ANDREA BEATRIZ ARCUCCI comparten un mismo interés por la paleontología de vertebrados. Rougier, doctor en ciencias biológicas por la Universidad de Buenos Aires, se ha especializado en fauna triásica. De la Fuente, adscrito al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina, desarrolla un proyecto de investigación sobre sistemática, filogenia y evolución biogeográfica de tortugas fósiles. Arcucci, experta en paleontología de reptiles, es investigadora en la Universidad Nacional de La Rioja.

condujo en las tortugas al desarrollo de un caparazón. Antes bien, esta formación surgió de la extensión de osificaciones dérmicas sobre las vértebras dorsales y costillas, con las cuales pueden fusionarse.

Andando el tiempo, se fueron atribuyendo a diversos grupos de amniotas basales un parentesco taxonómico con las tortugas. En el decenio de los sesenta se las vinculó con los Captorhinidae. Más tarde, Robert Reisz y Michel Laurin emparentaron las tortugas con los Procolophonia, otro linaje de Captorhinidae. Por último, Michael Lee, en 1993, realizó un estudio exhaustivo sobre las relaciones de parentesco entre amniotas basales. Identificó cuatro grupos de distanciamiento creciente del taxón constituido por las tortugas: Pareiasaurida, *Sclerosaurus*, Procolophonidae, Nyctiphruretida. Estos cuatro grupos vivieron fundamentalmente durante el Pérmico; con excepción del primero, todos eran de pequeño a mediano tamaño, con aspecto lacertiforme.

Lee abogó por formar con Pareiasauridae y Chelonia un grupo a partir de 16 caracteres diagnósticos comunes (sinapomorfías). De acuerdo con su hipótesis, los Pareiasauridae representarían el grupo más próximo a las tortugas; a ambos les unirían el tener un antepasado común más cercano que con cualquier otro grupo de amniotas. El origen del caparazón se explicaría a partir de las placas óseas dérmicas dispuestas en el dorso y los flancos de los Pareiasauridae. Estas placas se fusionarían entre sí hasta terminar por conformar el caparazón de los quelonios.

El hecho de que las tortugas triásicas posean un mayor número de elementos en el caparazón que las modernas apoya la idea de su origen a partir de múltiples osificaciones independientes. Además, entenderemos mejor el alojamiento interno de las cinturas escapulares si consideramos la disposición ligeramente curvada de las costillas en los Pareiasauridae. La tendencia al acortamiento del esqueleto axial y la presencia de sólo cinco vértebras cervicales en el cuello de los Pareiasauridae abonan la hipótesis del estrecho parentesco entre tortugas y Pareiasauridae. En ese contexto tendría cabida la explicación según la cual las ocho vértebras cervicales y la disposición interna de las cinturas de las tortugas resultan de la incorporación de la primera, segunda y tercera vértebras dorsales al cuello de las tortugas por desplazamiento posterior de la cintura escapular en los Pareiasauridae.

El Noriano es el lapso temporal del Triásico tardío que abarca entre



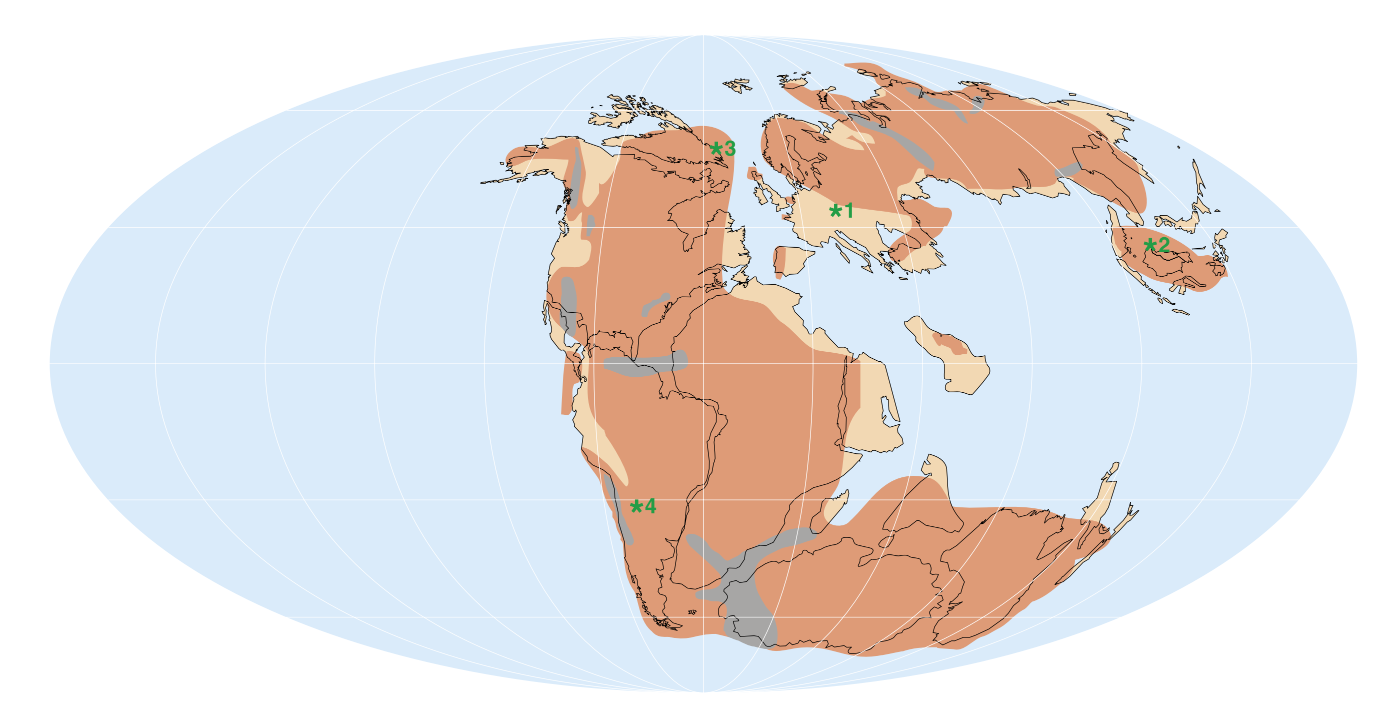


2. EN EL SECTOR SUPERIOR de la formación de Los Colorados, representado por los últimos 140 metros en una localidad situada a 2 km al NO de “La Esquina”, se han reconocido dos niveles fosilíferos. En el nivel superior situado a 30 metros del tope de la formación aparecieron las tortugas estudiadas por los autores. Quedaron allí sepultadas por un flujo de barro.

220 y 205 millones de años. De ese intervalo son las primeras tortugas. Ello significa que existe un hiato mínimo de 30 millones de años entre los quelonios más antiguos y cualquiera de los representantes de los grupos emparentados. No se han desenterrado fósiles de las formas que ocuparon ese lapso en que acontecieron las transformaciones más drásticas de la historia de los quelonios.

Las primitivas tortugas que conocemos poseían un verdadero caparazón y, por dientes, una cresta ósea con una cubierta córnea, igual que en las tortugas actuales. Hasta hace poco, sólo se conocían tres regiones con rocas del Noriano con restos de quelonios: Alemania, el sudeste de Asia y Groenlandia oriental. Durante el Noriano, la posición de los continentes difería radicalmente de la actual. En el transcurso del Triásico, y como resultado de la agregación de todos los grandes bloques continentales, se formó el supercontinente Pangea. Las tres regiones mencionadas caían en la porción norte del supercontinente.

A fines del Noriano y principios del Jurásico, Pangea se partió en dos, al norte Laurasia y al sur Gondwana. Este evento paleogeográfico, crucial,



3. MAPA PALEOGEOGRAFICO donde se señalan las líneas de costa de finales del Triásico, hace 220 millones de años. Por entonces, el gran supercontinente Pangea comenzaba a separarse en Laurasia (Norte) y Gondwana (Sur). América del Norte está aún vinculada a Gondwana. Se indican las cuatro regiones donde se han localizado yacimientos fosilíferos con tortugas norianas: Alemania, donde se colectaron 6 esqueletos de *Proganochelys quenstedti* y una docena de caparazones de *Proterochersis robusta* (*1*); de la formación Huai Hin Lat, en Tailandia nororiental, provienen especímenes muy incompletos de *Proganochelys ruchae* (*2*); en la formación Fleming Fjord, en Jameson Land, Groenlandia oriental, se desenterraron los fósiles de *Proganochelys sp*. (*3*); en la formación Los Colorados, de Argentina, se hallaron una quincena de *Palaeochersis talampayensis* (*4*).

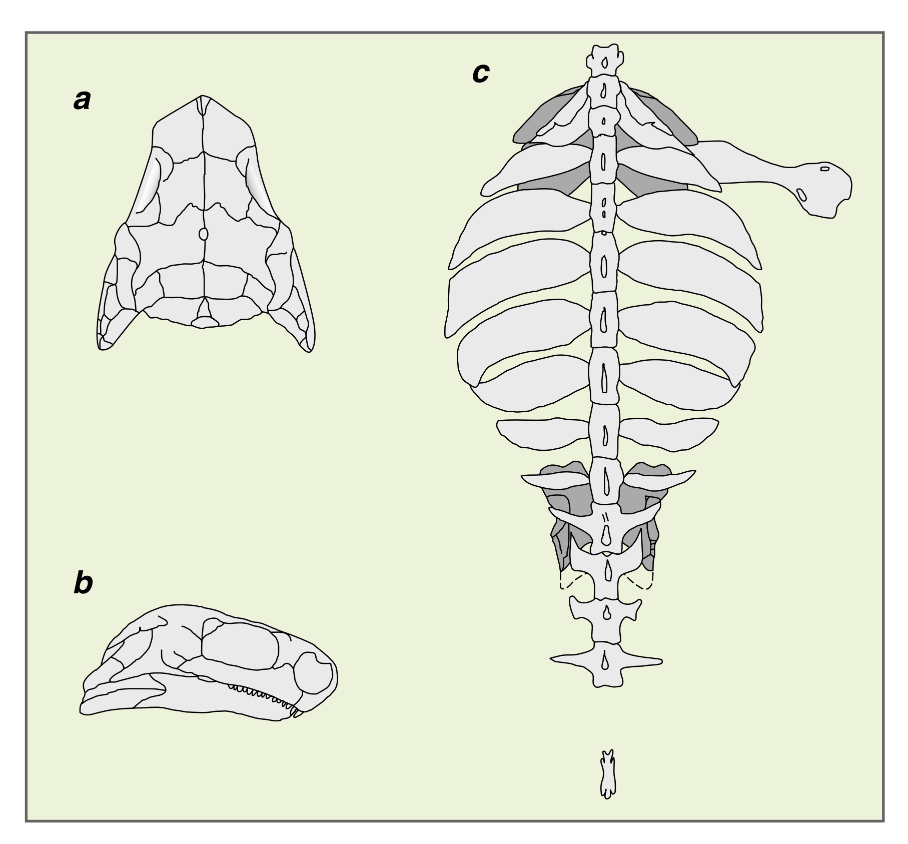
determinó el surgimiento de faunas endémicas de cada una de las masas continentales.

La primera alusión a las tortugas triásicas apareció en 1884. Edward Cope, paleontólogo norteamericano, designó así cierto espécimen colectado en las proximidades de Tubinga. En 1887, y en nota a pie de página, el paleontólogo alemán G. Baur se refería al ejemplar de Cope con el nombre de *Proganochelys quenstedti*. Con el tiempo se fueron desenterrando en las canteras alemanas de Trossingen-Aixheim y Halberstadt hasta seis especímenes más de *P. quenstedti*, procedentes del Triásico superior.

En Halberstadt, una de las tortugas apareció asociada a varios especímenes de *Plateosaurus* (dinosaurio prosaurópodo), fitosaurios (reptiles semejantes a los cocodrilos), anfibios laberintodontos y peces. Los depósitos portadores de esta asociación de vertebrados corresponden a ambientes continentales, aunque próximos al mar. Durante el Noriano la costa estaba cerca de Halberstadt.

En Murrhardt y Bentental bei Lorch, en el oeste alemán, se recogieron una docena de caparazones de otra tortuga triásica, ligeramente más vieja que *Proganochelys*. E. Fraas la bautizó, en 1913, con el nombre de *Proterochersis robusta*. Se la considera la pleurodira más antigua de cuantas se conocen. Las tortugas pleurodiras, uno de los dos grandes grupos de tortugas actuales, se caracterizan por retraer el cuello en un plano horizontal y poseer la pelvis fusionada al caparazón. El otro grupo, los criptodiros, retraen el cuello verticalmente y la pelvis no se fusiona al caparazón. Sin embargo, de *Proterochersis* sólo se conoce el caparazón, la pelvis fusionada y otros pocos elementos, por ello Fraas no disponía, ni disponemos nosotros, de elementos suficientes para vincularla firmemente con los pleurodiros.

A lo largo de casi 70 años cuanto se sabía de las etapas tempranas de la evolución de las tortugas estaba limitado a lo inferible a partir de esos escasos restos extraídos a fines del siglo pasado y principios de éste. En 1982, France de Broin y su grupo, del Museo Nacional de Historia Natural de París, comunicaron el hallazgo de tortugas triásicas en Tailandia. Esos fósiles, fragmentos de caparazón rescatados en depósitos lacustres continentales, sirvieron de tipo para una nueva especie de *Proganochelys*, *P. ruchae*. Las tortugas proceden de afloramientos expuestos en tres distintas localidades de Tailandia nororiental, asociadas con fauna de vertebrados e invertebrados. En 1993 Farish A. Jenkins y sus colaboradores, de la Universidad de Harvard, mencionaron restos fragmentarios de caparazón, atribuidos a una especie indeterminada de *Proganochelys*, en afloramientos, también continentales, del Triásico superior de Groenlandia oriental. Dicha fauna incluye diversos grupos presentes en las localidades alemanas, como dinosaurios prosaurópodos y aetosaurios (reptiles con una fuerte coraza de placas), además de pterosaurios, mamíferos y peces diversos, entre ellos tiburones.

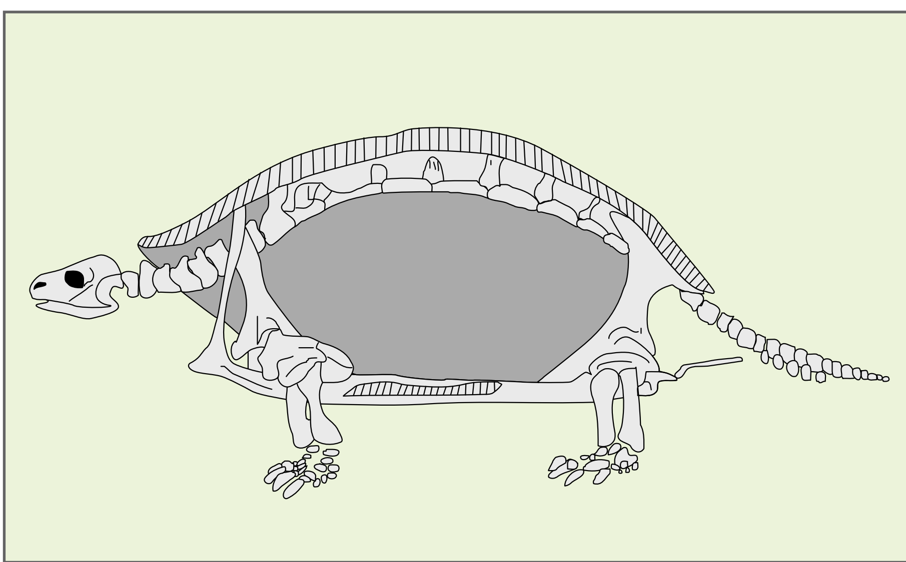


4. VISTA DORSAL Y LATERAL DEL CRANEO (*a-b*) de *Eunotosaurus africanus*, y vista dorsal del postcráneo (*c*). *Eunotosaurus* era un amniota pequeño del Pérmico medio de Africa del Sur (260 millones de años). A pesar de no estar vinculado con el origen de las tortugas, las costillas ensanchadas formaban una cubierta casi completa a la mayor parte del tronco. Los dientes sugieren una dieta insectívora.

Esa era la situación cuando entre 1992 y 1995 encontramos nuevas pruebas que permitían arrojar mayor luz sobre las tortugas que vivieron hace más de 200 millones de años. Dimos con ejemplares excepcionales de una nueva especie de tortuga triásica proveniente del centro sur de la provincia de La Rioja, en el noroeste argentino. Varias razones avalan el interés del hallazgo. En primer lugar, la abundancia de especímenes encontrados y el excelente estado de conservación de los mismos, lo que contrastaba con el exiguo muestrario de quelonios triásicos; además, se trata del primer yacimiento paleontológico situado en una masa continental meridional de Pangea; por último, la antigüedad de los restos, que supera en 60 millones de años la fecha asignada a la presencia de tortugas en América del Sur.

Las prospecciones realizadas por una comisión del Museo Argentino de Ciencias Naturales de Buenos Aires, encabezada por uno de nosotros (Rougier), en busca de mamíferos Triásicos resultaron, por el contrario, en la extracción de dos ejemplares de tortugas. Uno de los esqueletos rescatados durante la primera campaña, en 1992, presenta un excelente estado de preservación; conserva cráneo y mandíbulas, además de gran parte del caparazón y esqueleto apendicular. El cotejo de ese ejemplar con otros hallados posteriormente nos llevó a la creación en 1995 de un nuevo taxón: *Palaeochersis talampayensis*.





5. ESQUELETO ARTICULADO de *Palaeochersis talampayensis*, la tortuga triásica hallada en la formación Los Colorados. *Palaeochersis* es la tortuga más antigua de América del Sur. Visto en sección longitudinal, distinguimos en el cráneo las fosas nasales externas elongadas y el incipiente desarrollo de una cavidad del oído medio. Mientras que en el postcráneo se ven los procesos epiplastrales (clavículas), la primitiva cintura escapular, un corto puente plastral, el isquion fusionado al plastrón y articulado con el hipoisquion.

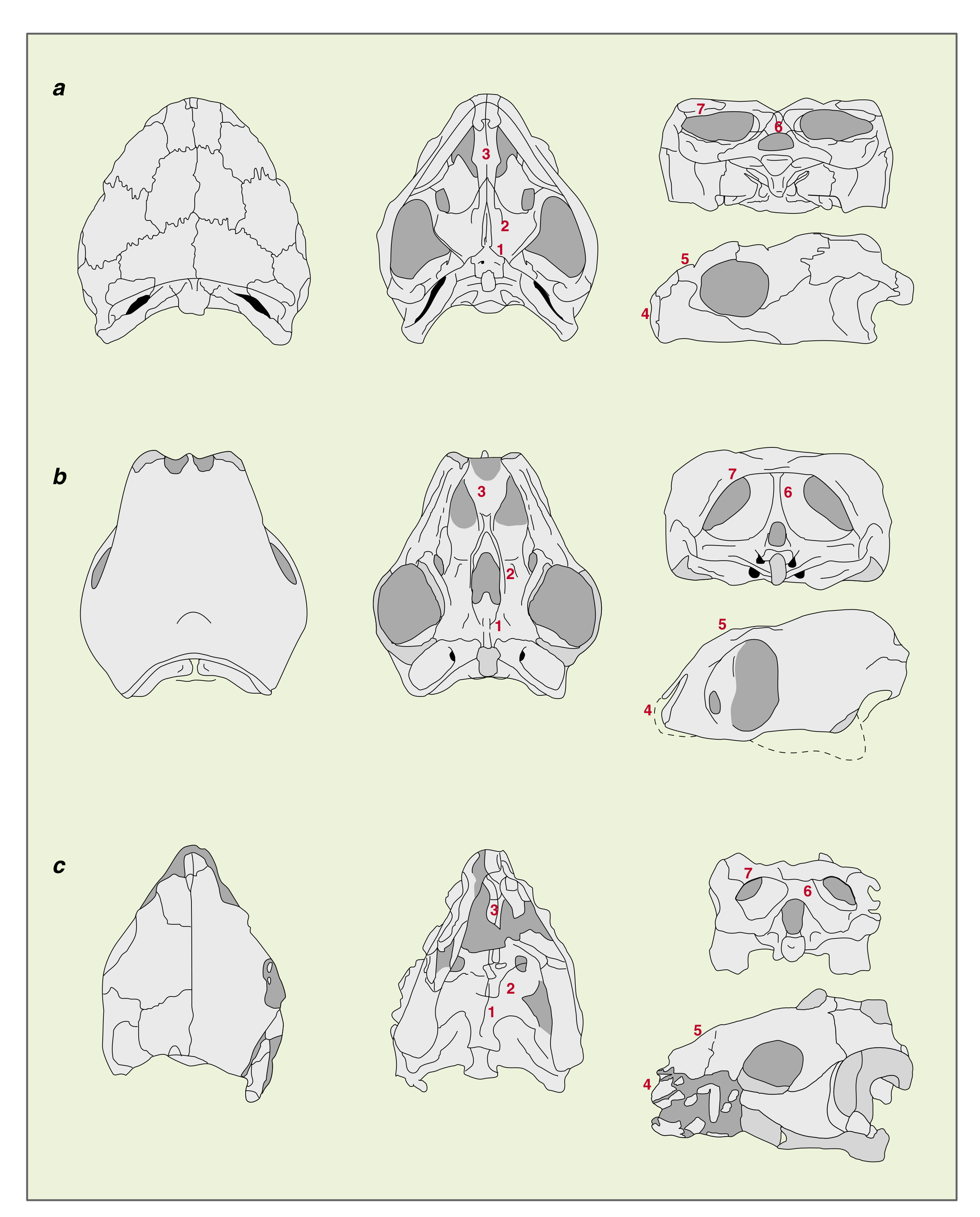
El marco majestuoso de las primeras estribaciones de la precordillera andina sirve de fondo al nuevo yacimiento de quelonios situado en la provincia de La Rioja. Geológicamente, forma parte de la cuenca Ischigualasto-Villa Unión, donde se ha depositado una secuencia sedimentaria que abarca desde la parte alta del Triásico temprano hasta fines del Triásico tardío (240-205 millones de años). Esta secuencia triásica culmina con la formación Los Colorados, cuyas rocas están constituidas por areniscas con tonalidades rojizas. Tales rocas suprayacen a la formación Ischigualasto, en cuyo "Valle de la Luna" se han encontrado los restos de *Eoraptor* y *Herrerasaurus*, que se cuentan entre los dinosaurios más primitivos.

En Los Colorados aparece una fauna muy variada. Se han encontrado formas afines a los primeros mamíferos y arcosauriomorfos, el grupo que incluye a los cocodrilos y aves entre los animales actuales y diversas formas fósiles. Entre los arcosauriamorfos registrados hay aetosaurios, primitivos cocodrilos, "tecodontos" y dinosaurios prosaurópodos. El estudio de estos vertebrados realizado por José Bonaparte en los años setenta permitió establecer que se trataba de una asociación faunística continental y referir el sector superior de la formación Los Colorados al Noriano. Para llegar a esta conclusión, se compararon los taxones de Los Colorados con los de otras regiones del mundo. Varios grupos de Los Colorados no superan el límite Triásico-Jurásico, mientras que otros no están presentes antes del Noriano.

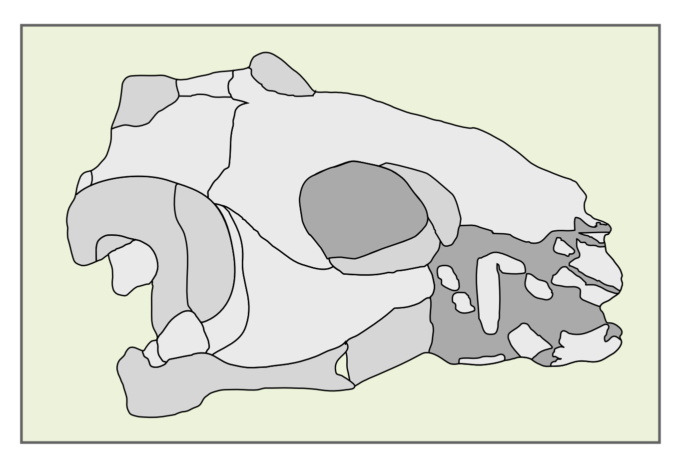
En septiembre de 1994, retornamos al yacimiento en compañía de Gerardo Cladera, sedimentólogo de la Universidad de Buenos Aires. Para sorpresa nuestra, en los últimos 140 metros de espesor de la formación Los Colorados del yacimiento descubierto dos años antes, pudimos reconocer dos niveles fosilíferos, situados a 90 metros el uno del otro. El nivel inferior ubicado sobre un paleosuelo brindó restos de un dinosaurio prosaurópodo, así como numerosos restos aislados de arcosauriomorfos de mediano y gran tamaño. Pero aún más inesperadamente, en el nivel fosilífero superior situado a 30 metros del tope de la formación descubrimos al menos 15 esqueletos articulados de *Palaeochersis*, en la base de un estrato arcilloso interpretado como un flujo de barro. Los flujos de barro son grandes desplazamientos de sedimentos acumulados en regiones con elevada pendiente, puestos en movimiento por ocasionales lluvias copiosas que saturan el suelo o por temblores. Las tortugas quedaron sepultadas por este flujo de barro, que las mantuvo en posición; sólo hay un esqueleto que esté invertido en la base de este horizonte.

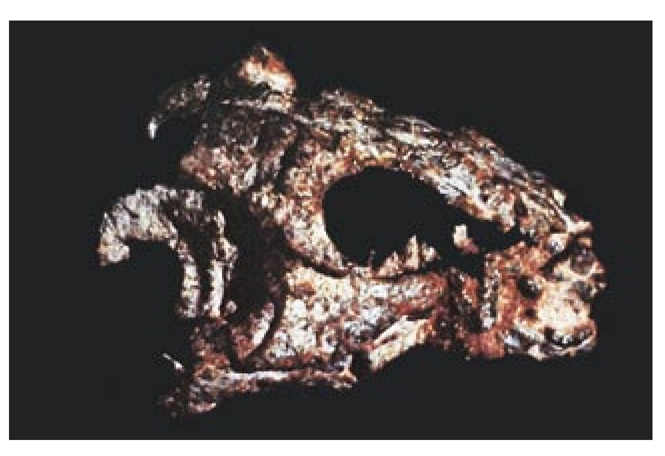
Gracias a la extrema densidad de los flujos de barro, los especímenes se han conservado magníficamente. Sin embargo, las rocas de los alrededores son en su mayoría areniscas, depositadas en forma de dunas por fuertes vientos. Entre ellas podían desarrollarse ocasionales cuerpos de agua de muy corta duración, cuyos cursos eran rellenados por las dunas o, de modo más esporádico, por flujos de barro, como en el caso de las tortugas. Estas características de la secuencia rocosa nos sugieren que las condiciones climático-ambientales en las cuales vivían los organismos encontrados eran áridas con marcada estacionalidad, lo que encaja muy bien con la naturaleza continental-terrestre de los tetrápodos del sector superior de la formación Los Colorados y con un fenómeno de aridez y desertización reconocido para el Triásico tardío en forma global.

Proganochelys, la tortuga del Noriano de Alemania, presenta un conjunto de caracteres primitivos que no manifiestan las modernas casiquelidias (el grupo integrado por pleurodiros y criptodiros). Esta circunstancia llevó a E. Gaffney y L. Meeker en 1983 a considerar a *Proganochelys* un taxón basal respecto de las restantes tortugas.



6. VISTAS DORSALES, ventrales, posteriores y laterales de los cráneos de (*a*) *Proganochelys quenstedti* (Triásico superior de Alemania), (*b*) *Australochelys africanus* (Jurásico inferior de Africa del Sur) y (*c*) *Palaeochersis talampayensis* (Triásico superior de Argentina). En los cráneos de *Palaeochersis* como en *Australochelys* se reconocen un conjunto de caracteres más avanzados con respecto a *Proganochelys* tales como: la fusión basipterigoidea (*1*), la reducción de las placas dentarias a una sola hilera sobre una cresta (*2*), vómeres sin placas dentarias (*3*), fosas nasales externas elongadas (*4*), plataforma nasal (*5*), una ancha plataforma occipital (*6*) y las fosas temporales parcialmente encerradas por los rebordes del techo craneano (*7*). Las zonas sombreadas indican sedimento o una abertura craneana.

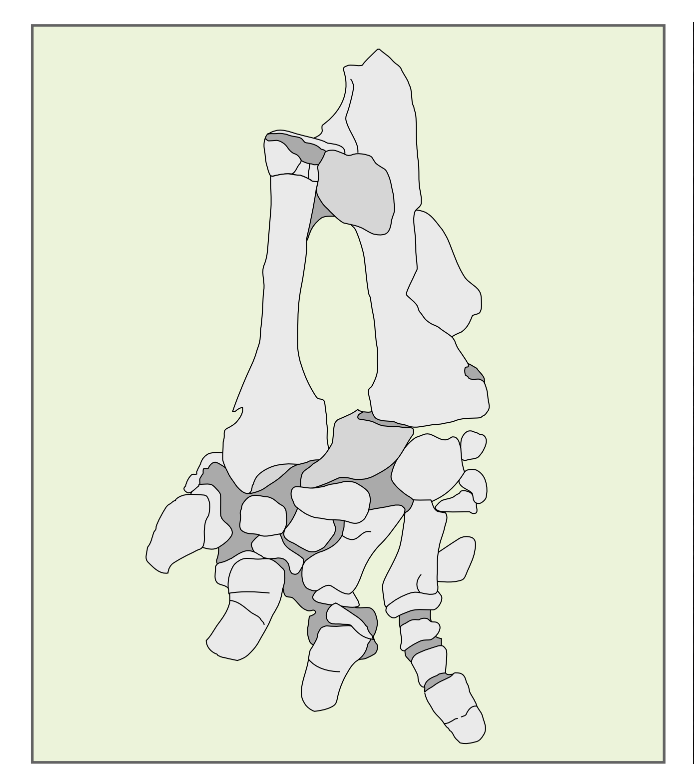




7. VISTA LATERAL DEL CRANEO de *Palaeochersis talampayensis*. El sector anterior está mal conservado. El sombreado indica sedimento o la cavidad orbital. Se reconocen rasgos primitivos como son la persistencia de un supratemporal, que se pierde en las tortugas modernas, y el desarrollo de una cavidad timpánica poco profunda, que en los casiquelidios presenta una característica forma de embudo.

En *Proganochelys* se reconocen un sinnúmero de caracteres craneanos primitivos: articulación entre el paladar y el basicráneo, que permite el movimiento de ambos; aperturas nasales externas separadas por una proyección del premaxilar (en las tortugas actuales las fosas nasales están separadas por elementos córneos); dientes en el paladar; y huesos que se pierden o fusionan en los grupos más avanzados, como los supratemporales y vómeres. El plastrón de *Proganochelys*, la porción inferior del caparazón, muestra asimismo rasgos primitivos, como son la persistencia de proyecciones epiplastrales y un proceso entoplastral expandido posteriormente (vestigios de las clavículas e interclavícula).

Aunque en *Palaeochersis*, la tortuga argentina, persisten muchos de los rasgos primitivos manifestados en *Proganochelys*, otros son ya avanzados. Mencionaremos, por ejemplo, la fusión del paladar con el basicráneo, un incipente desarrollo de una cavidad auditiva, y la fusión pélvica; de ello se desprende que *Palaeochersis* es una tortuga más evolucionada que *Proganochelys*. De acuerdo con nuestra investigación de los fósiles, *Palaeochersis* ocupa una

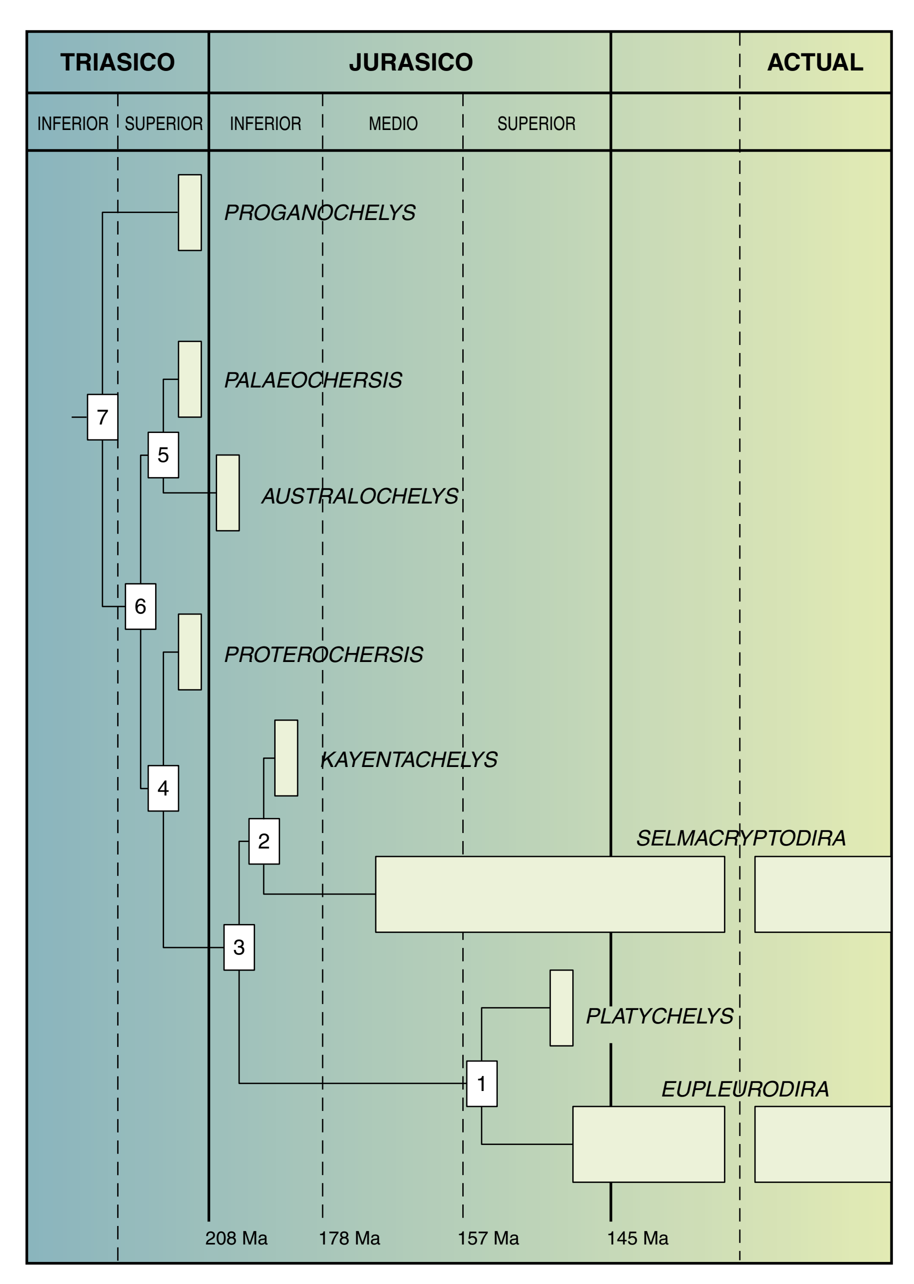




8. ANTEBRAZO Y MANO de *Palaeochersis talampayensis*. La mano de *Palaeochersis* dispone sólo de cuatro dígitos con dos falanges cada una. La reducción del número de falanges está presente en tortugas terrestres de la subfamilia Testudininae, así como en el pelomedúsico acuático *Pelomedusa*; la pérdida del quinto dígito es conocida en las tortugas terrestres Meiolaniidae. Esta morfología sugiere la ausencia de una membrana interdigital en *Palaeochersis*, presente en las formas anfibias vivientes. Las especializaciones pediales y la combadura del caparazón parecen sugerir hábitos al menos parcialmente terrestres para la tortuga de Los Colorados al igual que el paleoambiente.

posición basal entre los raptoquelidios. Esta es una nueva categoría taxonómica acuñada por E. Gaffney y J. Kitching en 1994 para agrupar a *Australochelys africanus* y las tortugas casiquelidias. *Australochelys* es la tortuga africana de mayor antigüedad, de la que sólo nos ha llegado un cráneo y un fragmento del caparazón del Jurásico temprano.

Australochelys, de Sudáfrica, y *Palaeochersis*, de Argentina, pueden agruparse dentro de la misma familia, Australochelidae, pues comparten muchas sinapomorfías (rasgos derivados en común): fosas nasales externas elongadas, una plataforma nasal, una placa occipital ancha con depresiones para la inserción de la musculatura del cuello y una fosa temporal parcialmente cerrada por un reborde del techo craneano, entre otros rasgos comunes. La ubicación geográfica de los dos miembros de la familia Australochelidae, Sudáfrica y Argentina respectivamente, sugiere una distribución meridional en el ámbito gondwánico de Pangea. De su cotejo resulta que la familia Australochelidae constituye el taxón hermano de Proterochersis y los casiquelidios. Dicha posición en la secuencia filogenética es intermedia entre *Proganochelys* y las restantes tortugas conocidas.



9. ARBOL FILOGENETICO DE LAS TORTUGAS. Hacia fines del Triásico las tortugas habían desarrollado una radiación adaptativa representada por lo menos por tres grupos distribuidos en regiones septentrionales (*Proganochelys quenstedti*, *P. ruchae*, *Proterochersis robusta*) y meridionales (*Palaeochersis talampayensis*) de la Pangea. Los Australochelidae (*Australochelys* más *Palaeochersis*) constituyen un grupo intermedio en la secuencia filogenética entre *Proganochelys* y las restantes tortugas, que no ha dejado descendientes vivientes. Nodo 1 = Pleurodira; Nodo 2 = Cryptodira; Nodo 3 = Casichelydia; Nodo 4 = innominado; Nodo 5 = Australochelidae; Nodo 6 = Rhaptochelydia; Nodo 7 = Testudines.

Palaeochersis y *Proganochelys* poseen vértebras cervicales anficélicas (cuerpos vertebrales con centros articulares cóncavos). No pueden, pues, efectuar la retracción del cuello dentro del caparazón. Esta táctica defensiva, tan notable en las tortugas vivientes, se produce ahora mediante la flexión del cuello en un plano sagital (criptodiros) o en un plano lateral (pleurodiros). En *Palaeochersis*, sin embargo, ese mecanismo se reemplaza por una extensión del caparazón que cubre el cuello dorsalmente; en *Proganochelys* el cuello no retraído está protegido por osificaciones dérmicas en forma de púas sobre las vértebras cervicales. En resumen, se logró proteger un cuello vulnerable al menos de tres modos diferentes durante la evolución del grupo; mediante púas óseas y proyección del caparazón en las formas triásicas y a través de la flexión dentro del caparazón en los grupos modernos.

Por otra parte, *Palaeochersis* y *Proganochelys* comparten dos caracteres peculiares: el hipoisquio, una osificación articulada en la pelvis de la que carecen los tetrápodos, y la presencia de sólo dos falanges en los dígitos del autopodio anterior (mano) y el posterior (pie). A diferencia de *Proganochelys*, dotado de cinco dedos como la mayoría de los amniotas primitivos, la mano y el pie de *Palaeochersis* posee sólo cuatro dedos. La reducción del número de dedos y falanges, sumada a la peculiar morfología de los miembros anteriores y posteriores, sugiere que *Palaeochersis* era de costumbres, al menos en parte, terrestres. Gaffney y Kitching atribuyen hábitos similares a *Australochelys*.

Hasta una veintena de sinapomorfías o novedades evolutivas avalan la creación del grupo de los Rhaptochelydia, que abarca Australochelidae, las tortugas modernas y todos los grupos emparentados con ellos. La mayoría de

tales caracteres guardan relación con la consolidación y modificación del paladar y el desarrollo de estructuras del oído. Otros están vinculados con modificaciones de la musculatura de la parte posterior del cráneo y el cuello. De las veinte sinapomorfías que caracterizan a los raptoquelidios, solamente dos conciernen al postcráneo. De ello se desprende que el cráneo de las tortugas primitivas ha sufrido muchas transformaciones, mientras que el esqueleto postcraneano, en especial el caparazón, no ha cambiado en la misma medida. El caparazón de las tortugas ha mantenido su plano estructural básico desde el Triásico.

Dijimos antes que la pelvis fusionada de *Proterochersis*, del Triásico de Alemania, se tomó como prueba para establecer el parentesco de *Proterochersis* con los pleurodiros. Sin embargo, la asociación entre una pelvis fusionada con el caparazón de *Palaeochersis* y un cráneo sin caracteres de Pleurodira justifica la exclusión de *Proterochersis* de Pleurodira y su posición más primitiva en la filogenia de las restantes tortugas. En un marco más general, nuestra hipótesis de relaciones de las tortugas primitivas implica que la fusión pélvica, considerada desde siempre carácter distintivo de los pleurodiros, constituye un rasgo primitivo para la mayoría de los grupos de tortugas que se ha perdido secundariamente en los criptodiros.

De la descripción de *Proterochersis* se deduce que las tortugas triásicas no se inscriben en ninguno de los grupos modernos, inferencia que pone en cuestión la idea según la cual pleurodiros y criptodiros (los grupos que incluyen a todas las tortugas vivientes) habrían aparecido durante el Triásico superior. Si surgieron entonces las tortugas casiquelidias se habrían originado en el mismo momento que la mayoría de los grandes grupos de animales actuales, como los anuros, cocodrilos y mamíferos. Las tortugas casiquelidias abarcan pleurodiros y criptodiros; pues bien, los registros más antiguos corresponden a *Kayentachelys* del Jurásico inferior de Arizona para los criptodiros y a *Platychelys* del Jurásico superior de Suiza, para los pleurodiros; es decir, hace 185 millones de años para aquéllos y 156 millones de años para éstos.

Las filogenias de los quelonios están basadas en caracteres craneanos y en menor medida en caracteres postcraneanos. Nada tiene de particular, pues, que las relaciones de parentesco sugeridas difieran de las obtenidas cuando sólo se atiende a los rasgos postcraneanos. No es fácil armonizar ambos criterios. De algunos ejemplares fosilizados sólo poseemos el cráneo, de otros disponemos únicamente de los caparazones.

Si hubiéramos descubierto solamente el cráneo de *Palaeochersis* la ubicación sistemática sería la propuesta. Pero si se hubiera rescatado de Los Colorados un caparazón, nos veríamos forzados a pensar que ciertos primitivos pleurodiros estaban presentes en el triásico de Argentina (*Palaeochersis*) al igual que en Alemania (*Proterochersis*). Teniendo en cuenta los pocos caracteres postcraneanos, la pelvis fusionada de *Palaeochersis* la hubiese relacionado inevitablemente con los pleurodiros, lo cual no ocurre cuando se consideran a la vez los caracteres craneanos y postcraneanos.

Vemos, pues, que a lo largo de la evolución de las tortugas, han aparecido, o desaparecido, varias veces, diversos caracteres. Por decirlo con el tecnicismo al uso, las tortugas han experimentado una evolución homoplásica. En consecuencia, el rescate de cráneos y esqueletos postcraneanos asociados es un requisito indispensable para reconocer los rasgos homoplásicos y elaborar hipótesis de parentesco entre los grupos de tortugas.

Hacia fines del Triásico, las tortugas habían experimentado una importante radiación adaptativa y presentaban una amplia distribución geográfica. Había tres grupos diferentes (*Proganochelys*, Australochelidae y *Proterochersis*) que cubrían las regiones septentrionales y meridionales de Pangea. Ese trío desplegó una importante diversidad ecológica con formas anfibias dulceacuícolas (*Proganochelys*) o formas terrestres (*Proterochersis* y posiblemente los Australochelidae). Esta diversidad nos sugiere que los quelonios se originaron y evolucionaron tempranamente durante el Triásico.

Se insiste con frecuencia en que la fauna del Triásico es muy homogénea, en que géneros de una misma familia pueden tener una distribución ecuménica. Sin negar esa observación, hemos de decir que algunas familias están mayormente restringidas a la porción norte de la Pangea triásica (así los fitosaurios) o a los continentes del sur (los Australochelidae). Ello sugiere que antes de que se produjera la partición del supercontinente Pangea, se habían diferenciado ya dos grandes subunidades faunísticas.

Las tortugas muestran un plan general muy conservador, cuyos rasgos principales se habían asentado plenamente en el Triásico tardío. Comparado con lo ocurrido en los mamíferos, o con los dinosaurios triásicos y las aves, los cambios operados en los quelonios parecen constituir leves ajustes de un modelo de eficacia contrastada. La diversidad de grupos que han brotado de este plan común, su dispersión geográfica y los variados ambientes en que se encuentran, dan fe de su adaptación. Su paso lento ha sabido conducir a las tortugas a través de 200 millones de años en este cambiante planeta que ha visto la desaparición de los grandes dinosaurios y tantos otros grupos numerosos y diversos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LOS TETRÁPODOS DEL SECTOR SUPERIOR DE LA FORMACIÓN LOS COLORADOS, J. F. Bonaparte, *Opera lilloana* 22, páginas 1-184; 1971.

EL MESOZOICO DE AMÉRICA DEL SUR Y SUS TETRÁPODOS, J. F. Bonaparte. *Opera lilloana* 26, páginas 1-596; 1978.

THE COMPARATIVE OSTEOLOGY OF THE TRIASSIC TURTLE *PROGANOCHELYS*. E. S. Gaffney, *Bulletin of the American Museum of Natural History*, n.º 194, páginas 1-263; 1990.

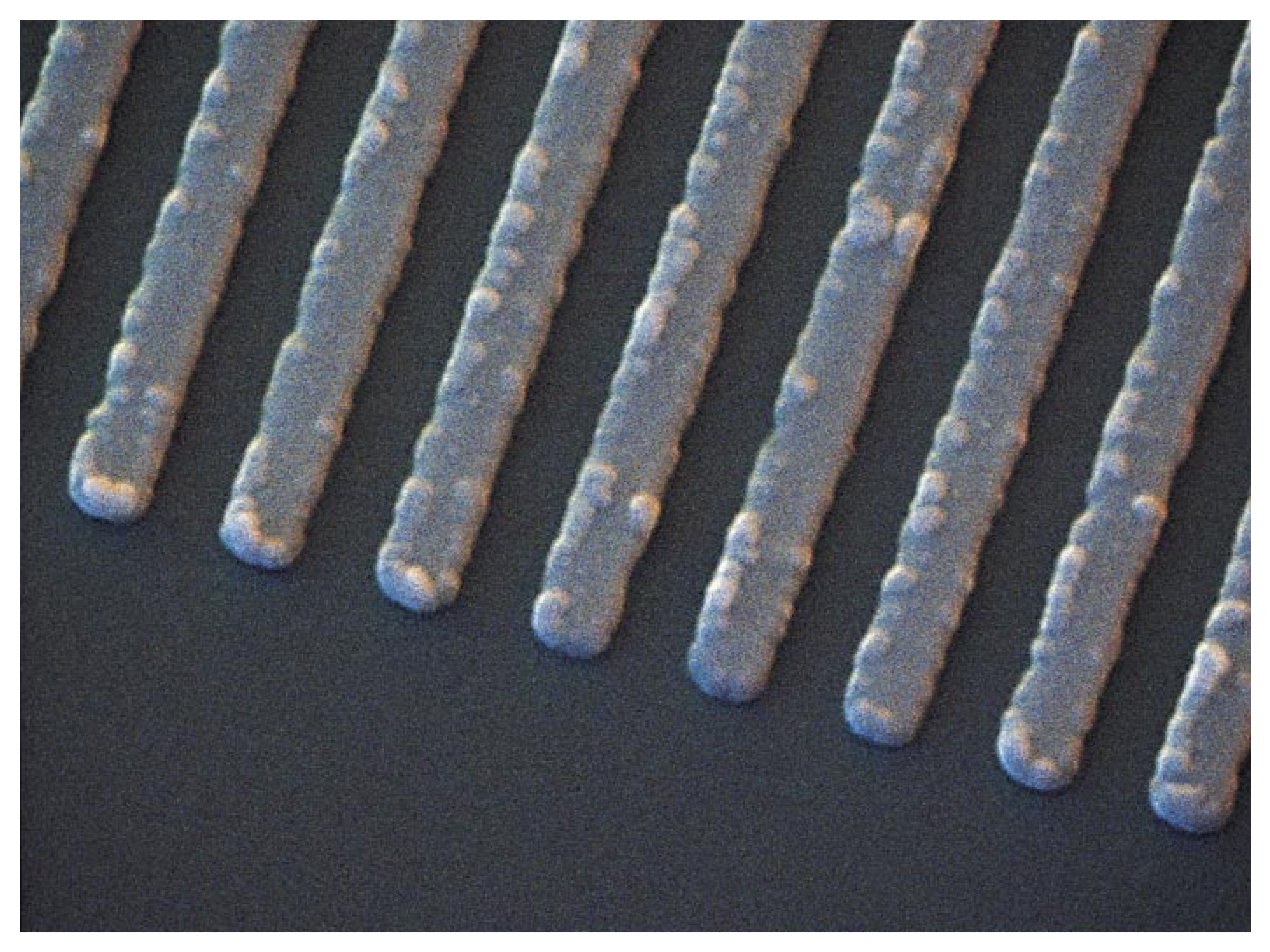
THE MOST ANCIENT AFRICAN TURTLE. E. S. Gaffney y J. W. Kitching, *Nature*, n.º 369, páginas 55-58; 1994.

A PHYLOGENY OF TURTLES. Dirigido por J. Benton, en *The Phylogeny and Classification of the Tetrapods*, E. S. Gaffney y P. A. Meylan (Eds.). Volumen 1. Amphibians, Reptils, Birds. Systematic Association Special, volumen n.º 35, páginas 157-219; 1988.

THE ORIGIN OF THE TURTLE BODY PLAN: BRIDGING A FAMOUS MORPHOLOGICAL GAP, M. S. Y. Lee, *Science*, vol. 261, páginas 1716-1720; 1993.

OWENETTA AND THE ORIGIN OF TURTLES, R. R. Reisz y M. Laurin, *Nature*, vol. 349, páginas 324-326; 1991.

LATE TRIASSIC TURTLES FROM SOUTH AMERICA. G. W. Rougier, M. S. de la Fuente y A. Arcucci, *Science*, vol. 268, páginas 855-858; 1995.



Ultrasonidos de picosegundos

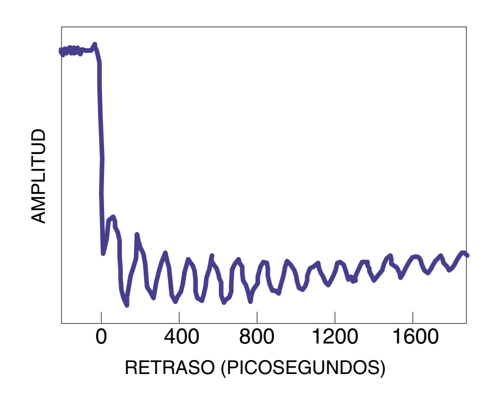
Se escrutan las conexiones de los microcircuitos con pulsaciones sonoras de gran frecuencia

Humphrey Maris

A lo largo de los últimos treinta años hemos desarrollado una notable capacidad de fabricar objetos diminutos. El ejemplo por excelencia son los microcircuitos, construidos a partir de obleas de silicio en las que se disponen estratégicamente las impurezas que forman transistores. Sobre cada chip va una serie de películas metálicas y de capas aislantes que conectan eléctricamente los transistores a sus vecinos. Las películas pueden ser no más gruesas que una millonésima de centímetro. El espesor y la uniformidad determinan el rendimiento del microcircuito y, en última instancia, del ordenador al que pertenezca.

El grosor de una película es de 50 angstrom a sólo unas micras (un angstrom mide 10^{-8} cm y una micra 10^{-4} cm). En las películas más delgadas hay que controlar la precisión hasta el angstrom, que es menos que el tamaño de un átomo. Medir el espesor resulta dificilísimo. El medio más eficaz del que se dispone hoy es destructivo: se toma un chip, se corta y se le mira por el lado. La mayoría de los fabricantes garantiza un grosor constante mediante el control minucioso del proceso de producción —temperatura, humedad y presión— y comprobando las dimensiones de los extraídos al azar.

En unos experimentos ópticos que estábamos haciendo en 1985 con un semiconductor mis compañeros de la Universidad de Brown y yo dirigimos una breve pulsación luminosa a una película metálica depositada sobre la superficie de la muestra. Queríamos estudiar la respuesta de sus electrones. Pero al enviar una segunda pulsación observamos que la reflectividad de la superficie cambiaba periódicamente: para nuestra sorpresa, vibraba y emitía ondas sonoras de



EL NANOXILOFONO (*página opuesta*) produce sonidos de una frecuencia de 8000 millones de hertz (o 24 octavas sobre el do medio); está hecho de barras de oro de menos de 150 átomos de grosor. La gráfica (*arriba*) representa el perfil temporal del sonido emitido. Con ondas de frecuencias menores, algunas de las cuales duran sólo un picosegundo (10^{-12}), se escrutan las configuraciones interiores de los chips.

una longitud de onda diminuta, de unos 500 angstrom sólo. Hasta ese momento nadie había barruntado que se pudieran crear pulsaciones sonoras de frecuencia tan alta y además de muy corta duración.

Desde entonces hemos venido desarrollando una técnica que aprovecha estas pulsaciones sonoras para medir estructuras muy pequeñas; así, para calibrar la piel metálica de un chip. Con los ecos separados que devuelven las superficies superior e inferior de un película determinamos su grosor.

Para ver lo que hace falta para medir un espesor con sonidos, recordemos una de las maravillas técnicas de la naturaleza: los murciélagos. Hiram Maxim, conocido sobre todo por los aviones que construyó y por haber inventado la ametralladora, ya apuntó que los murciélagos se valían del sonar —acrónimo en inglés de "navegación y determinación del alcance por medio del sonido"— para localizar insectos voladores. Pensaba que utilizaban el sonido que genera el batir de sus alas. Pero un sonido de baja frecuencia como ése consiste en unas ondas largas, que fluyen alrededor de los objetos pequeños sin dispersarse en ellos con facilidad; costaba entender, por consiguiente, si uno se basaba en la hipótesis de Maxim, cómo era que los murciélagos oían el eco debilísimo de un insecto volador.

En 1920 Hamilton Hartridge planteó que los murciélagos emitían pulsaciones de ultrasonidos —cuyas frecuencias caen por encima de lo que un ser humano puede oír— y que con sus ecos detectaban los insectos. George W. Pierce y Donald R. Griffin observaron esas pulsaciones en 1938. Se ha sabido después que los delfines y algunas aves emplean el sonar. Hasta los humildes escarabajos girínidos localizan cosas gracias a la reflexión del frente de onda que producen cuando se desplazan por el agua.

Sorprende lo refinado que es el sonar del murciélago. Como el insecto se mueve, el eco que produce tendrá una frecuencia un poco distinta de la que porte la pulsación sonora emitida por el mamífero. Con este cambio de la frecuencia, o efecto Doppler, el murciélago calcula la velocidad y dirección del insecto. Además, el murciélago varía la frecuencia cada vez que emite una pulsación. Esta modulación le sirve para analizar el eco y es probable que también para distinguir otras características de la presa: la forma, el tamaño y la velocidad a la que bate las alas.

Para determinar la distancia a un insecto el murciélago tiene que enviar un impulso sonoro breve, que haya terminado antes de que vuelva el eco. La velocidad del sonido en el aire es de 330 metros por segundo, así que el sonido tardará justo un cincuentavo de segundo en llegar a un insecto que esté a 3,3 metros y volver. Cuando el murciélago va contra un insecto lanza ráfagas de silbidos, de un milisegundo de duración cada una. Así localiza la presa que esté a menos de un metro.

El problema del tiempo se torna más arduo cuando hay que calibrar el espesor de una estructura metálica pequeñísima. La velocidad del sonido en el aluminio es de 6000 metros por segundo, unas 20 veces mayor que en el aire. En un viaje de ida y vuelta por una película de aluminio de un grosor de una millonésima de centímetro una onda de sonido tarda, pues, unas tres billonésimas de segundo. En consecuencia, mis compañeros y yo teníamos que encontrar la manera de generar pulsaciones que fueran aún más breves si queríamos hacer mediciones con el sonar.

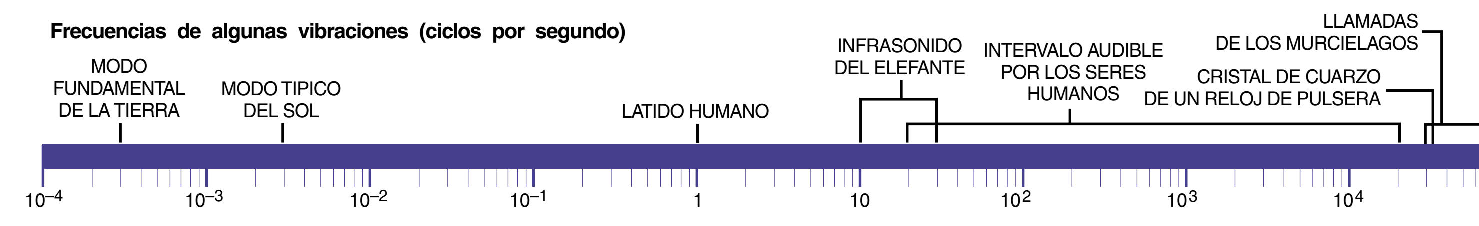
Para generar en el laboratorio un sonido en un sólido o en un líquido lo normal es usar un transductor piezoeléctrico. Este dispositivo está hecho de un material que, como el cuarzo, se expanda un poco cuando se le aplique un voltaje. Si se le somete a un voltaje alterno, el transductor vibra y lanza una onda de compresión —una pulsación sonora— de la misma frecuencia. Con esta técnica, que se remonta a los años veinte, se producen sonidos con frecuencias que van de los 100 kilociclos a los 1000 megaciclos y que duran sólo una millonésima de segundo. Gracias a esta brevedad es posible medir grosores de unos milímetros. Pero esta resolución no vale para los chips de los ordenadores.

Al final el progreso vino de los avances registrados en un área de investigación distinta. Theodore Maiman construyó en 1960 el primer láser. Se servía de una lámpara de destellos para excitar átomos de cromo incluidos en una barra de rubí hasta estados de mayor energía; el exceso de energía servía para amplificar la luz atrapada en la barra.

Este láser producía unas pulsaciones intensas de luz roja que duraban menos de una milésima de segundo. En los años siguientes se crearon muchos otros tipos de láseres, basados en una variedad de materiales y mecanismos. (Hasta hay un láser cuyo material activo es la gelatina.) A principios de los años ochenta los láseres producían corrientes de pulsaciones luminosas de sólo 10^{-14} segundos. Un paquete de luz tan corto es una ondulación del campo electromagnético que consta sólo de cinco longitudes de onda y no se extiende más que a lo largo de tres micras.

Para crear sonido, empleamos la luz de un láser de pulsos. Se enfoca el láser sobre la superficie de un material que absorbe los fotones en una capa superior muy delgada. La energía de los fotones la toman en un principio los electrones, que recorren deprisa un breve trecho del material y van perdiendo energía mientras lo hacen. El resultado es que la temperatura del material en las inmediaciones de la superficie crece súbitamente unos grados, con lo que la capa se expande. Se lanza entonces una onda sonora —a veces una sola compresión aislada, a veces un tren de ellas— dentro del material.

HUMPHREY MARIS enseña física en la Universidad de Brown. Aparte de los ultrasonidos de picosegundos, investiga el desarrollo de un detector de neutrinos solares, el fenómeno de la levitación y el comportamiento de los líquidos sometidos a presiones negativas.



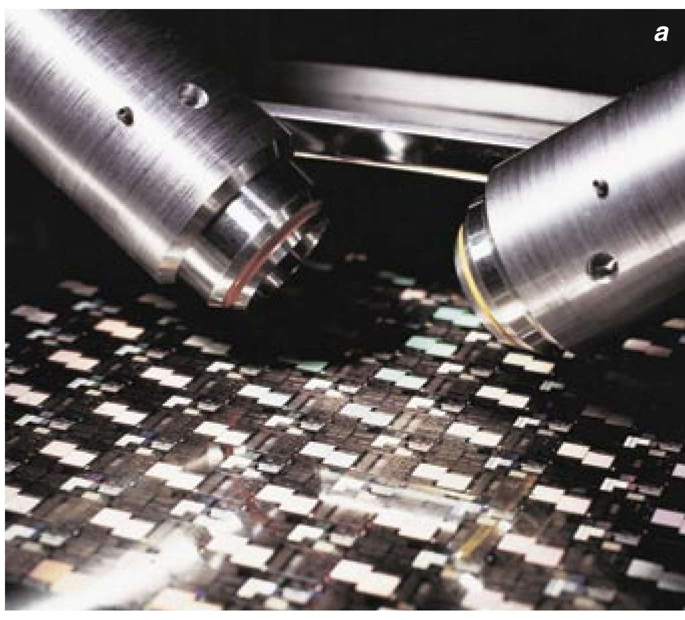
La pulsación sonora así producida puede no durar más que un picosegundo (10^{-12} segundos) y tener una longitud no mayor de unos nanómetros. Su amplitud, es decir, el espacio que desplaza los átomos, se cifra en una billonésima de centímetro, unas 10 veces el diámetro del núcleo de un átomo.

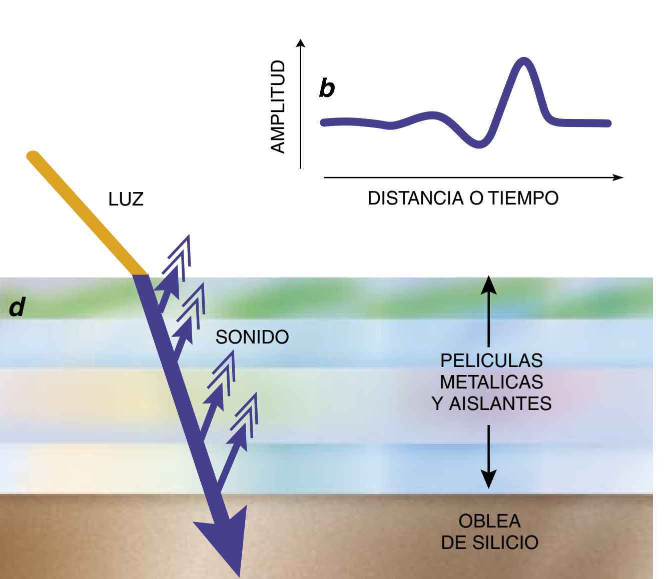
Hallada la forma de generar sonido, necesitábamos todavía la de detectar esas pulsaciones minúsculas una vez habían atravesado la muestra estudiada. Daba la casualidad de que sabíamos hacerlo gracias al descubrimiento fortuito mencionado antes. Cuando el eco vuelve a la superficie comprime periódicamente el material y altera su capacidad de reflejar la luz. Este cambio puede detectarse mediante un segundo pulso de luz dirigido a la superficie.

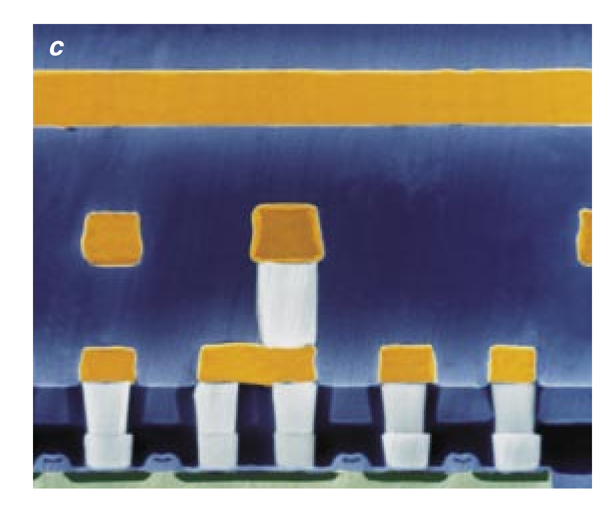
Las pulsaciones de ultrasonidos pueden medir el grosor de una película con precisión de menos de un angstrom, tamaño mucho menor que la longitud de onda del sonido, que está entre los 50 y los 500 angstrom. Los físicos suelen considerarlo imposible: una onda no puede ofrecer una resolución mayor que su propia longitud de onda. Nosotros hemos violado esta regla en la práctica

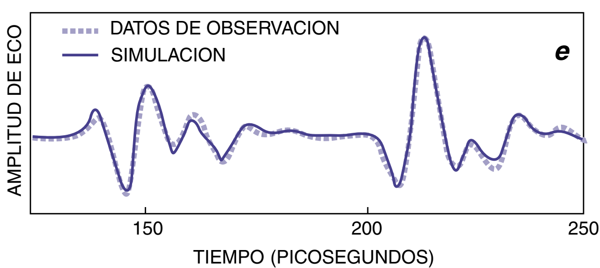
La sonda de picosegundos

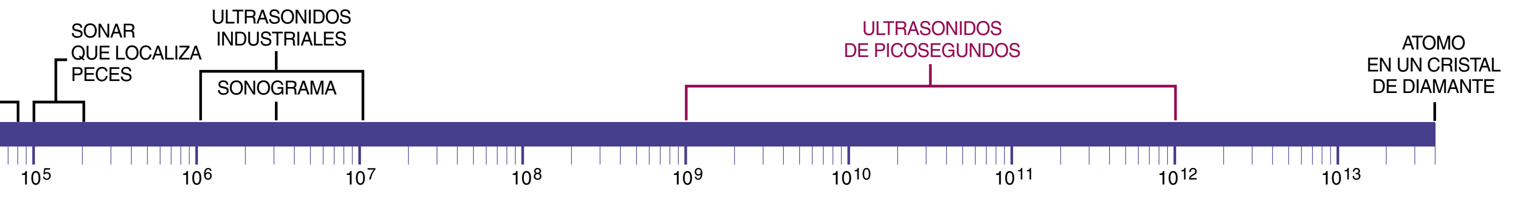
Las propiedades de las capas metálicas que hay en un chip de silicio se exploran con ultrasonidos. Un láser (*a*) dirigido contra la superficie del chip lo calienta, y se genera una pulsación sonora (*b*) de unos 100 angstrom de longitud o un picosegundo de duración. El sonido se refleja en varias estructuras dentro del chip; en (*c*) se ve su sección transversal, estilizada en el diagrama (*d*). Cuando vuelve a la superficie, el eco cambia las propiedades ópticas de ésta, que mide un segundo láser. Se compara entonces el eco con un modelo informático (*e*) para determinar la localización exacta, el espesor y el grado en que están unidas las capas internas. —*H. M.*











mediante la comparación del perfil de la onda sonora emitida con el de la onda de retorno. Aun cuando los extremos de una onda estén mal definidos, el pico se puede situar con mucha precisión. Así podemos determinar el momento en el que el eco alcanza su pico con una precisión de una fracción de picosegundo, y de esa forma establecemos la distancia que ha viajado con un error de menos de un angstrom. De manera similar procede la interferometría, técnica que se basa en la comparación de las formas de dos ondas.

Si creamos sonido, sugirió alguien del grupo, seguro que podremos hacer música. Con la ayuda de expertos del Centro de Investigación Thomas J. Watson de la empresa IBM, fabricamos un "nanoxilófono". Sus barras son placas de oro de menos de 400 angstrom —es decir, 150 átomos— de espesor y 2000 angstrom de ancho. Cuando golpeamos el nanoxilófono con una pulsación de luz se produce una nota de 8000 millones de vibraciones por segundo, unas 24 octavas por encima del do medio. Desde entonces hemos fabricado otras estructuras que vibran excitadas por pulsaciones de luz: la nota más aguda que hemos obtenido es de 700.000 millones de vibraciones por segundo, o unas 31 octavas sobre el do medio.

Estas técnicas tienen efectos prácticos para la comprobación de chips. La fabricación de un microcircuito, un proceso intrincado con cientos de pasos, dura varias semanas. Se empieza con un cristal de silicio muy puro, que se corta en rebanadas y se pule hasta darle la forma de una oblea redonda, por lo normal de 20 centímetros de diámetro y un espesor de una fracción de milímetro. Para formar los transistores que crean las características del chip se implantan en su superficie impurezas especialmente escogidas. Sobre la oblea se deposita una serie, la "pila", de películas delgadas hechas de materiales diferentes, algunos metálicos, otros aislantes.

Las películas metálicas hacen de conexiones eléctricas entre las partes del chip; forman un patrón complejo que recorre la oblea y recuerda a una red de carreteras, con sus pasos elevados y sus cruces. Las películas aislantes, por lo usual de vidrio o de polímero, aíslan eléctricamente las diferentes capas de metal. El proceso entero de fabricación requiere una limpieza y un control extremos; basta con una sola partícula de polvo para arruinar un chip. Al final se divide cada oblea en unos cien chips.

El funcionamiento de un chip requiere la sincronización de los transistores. De ahí la importancia capital del tiempo que tarda una señal en pasar de un transistor a otro. Esta "constante de tiempo" es proporcional a la resistencia de la película metálica que separa los dos componentes; la resistencia, a su vez, es inversamente proporcional al espesor de la película. El control del grosor, pues, es vital para el funcionamiento del chip.

Con los ultrasonidos que duran picosegundos pueden los fabricantes medir con precisión el espesor de las películas del chip. La capa superior de la pila absorbe la pulsación de luz que se dirige hacia la parte de la película que se quiere estudiar. El calentamiento y la expansión subsiguientes generan una pulsación sonora que atraviesa la pila. Cada vez que el sonido alcanza la frontera entre dos películas se refleja una parte. Del tiempo que estos ecos tardan en volver a lo más alto de la pila se infiere el grosor de cada capa.

Este método es similar a las técnicas sismológicas que determinan el grosor de las capas de la corteza terrestre. Con una diferencia: las películas de las pilas son a veces tan finas, que las ondas de sonido vuelven pisándose los talones unas a otras hasta solaparse. Una "interferencia" por el estilo es la que crea, cuando la luz se refleja en una película de aceite sobre agua, esas imágenes irisadas que vemos en los aparcamientos. En nuestro caso la interferencia de las ondas crea un patrón rítmico que hemos de descifrar para saber cuáles son la geometría y las dimensiones de las películas.

Los ecos descubren otras peculiaridades de la pila de películas. Cuando una pulsación sonora se refleja en una frontera irregular, por ejemplo, se ensanchará espacial y temporalmente: el análisis, pues, de la configuración del eco mostrará la irregularidad de la superficie. Además, de la intensidad del eco se puede deducir hasta qué punto están bien unidas dos películas adyacentes. Si es floja la conexión, quizá por culpa de una contaminación, el sonido no podrá cruzar la frontera y se reflejará la mayor parte de la pulsación. A partir de la intensidad de los ecos procedentes de las distintas interfaces se puede, pues, ratificar si las películas están bien ligadas y la improbabilidad de fallos mecánicos.

Esperamos emplear en la siguiente fase de nuestra investigación los ultrasonidos de picosegundos para estudiar los procesos celulares. Ya se han introducido en ginecología los ultrasonidos para observar el desarrollo de los fetos. Con las nuevas técnicas de producción de pulsaciones muy breves quizá podamos realizar experimentos análogos en el interior de las células, de las que esperamos crear con las ondas sonoras imágenes acústicas. Sería, por ejemplo, posible obtener con los ultrasonidos de picosegundos una imagen del citoesqueleto —el armazón que sostiene a la célula— que tuviera un detalle comparable al de las imágenes corrientes de rayos X del esqueleto humano.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

STUDY OF VIBRATIONAL MODES OF GOLD NANOSTRUCTURES BY PICOSECOND ULTRASONICS. H.-N. Lin *et al.* en *Journal of Applied Physics*, vol. 73, núm. 6, págs. 37-45: 1 de enero, 1993.

THE SCIENCE AND ENGINEERING OF MICROELECTRONIC FABRICATION. Stephen A. Campbell. Oxford University Press, 1996.

ULTRASONIC MULTILAYER METAL FILM METROLOGY. C. J. Morath *et al.* en *Solid State Technology*, volumen 40, núm. 6, páginas 85-92; junio de 1997.



Leonardo y la inven

Los cuadernos de Leonardo da Vinci están repletos de inventos, pero ¿llegó a materializarse alguno durante la vida del genio?

Vernard Foley

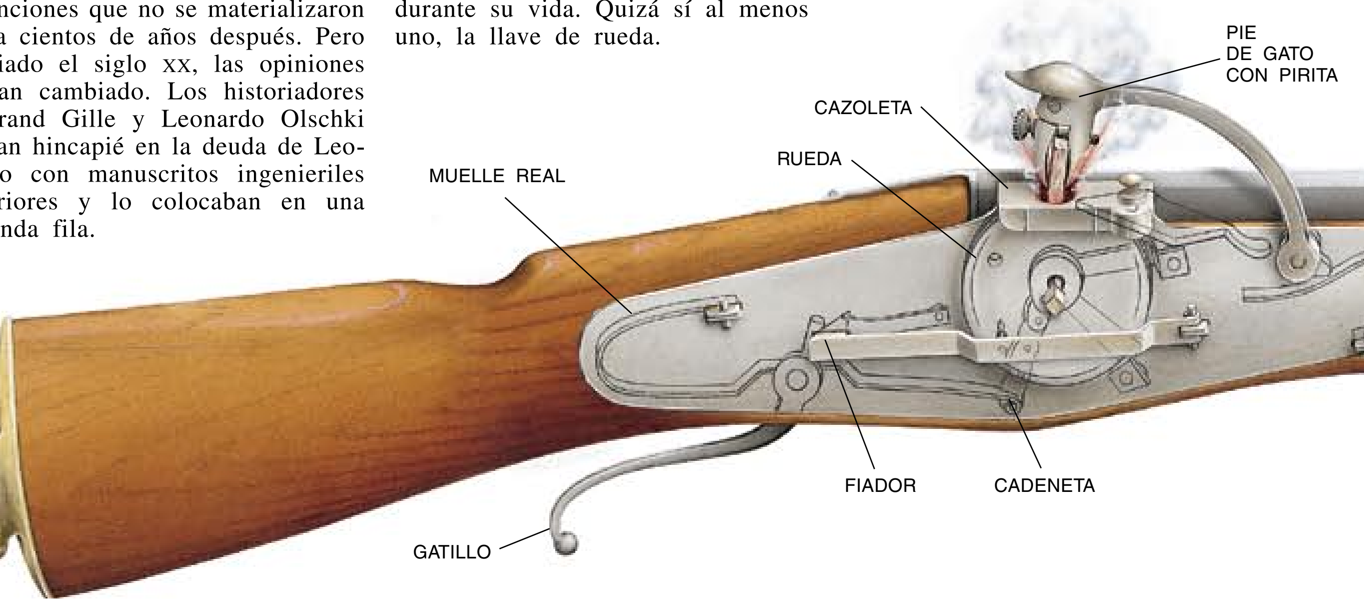
Cuenta la leyenda que Leonardo da Vinci murió preguntando si alguno de sus bocetos se había llevado a ejecución. Aunque los historiadores dudan de la veracidad del relato, lo cierto es que ese pensamiento aparece escrito en sus cuadernos, reflejando cuánto le pesaba no haber logrado más.

La cuestión de lo realmente obtenido por Leonardo durante los 67 años que vivió (1452-1519) ha vuelto a emerger entre los especialistas en historia de la técnica renacentista. Cuando sus manuscritos se publicaron por vez primera a principios del siglo XIX, sus lectores se asombraron ante aquellas páginas rebosantes de invenciones que no se materializaron hasta cientos de años después. Pero mediado el siglo XX, las opiniones habían cambiado. Los historiadores Bertrand Gille y Leonardo Olschki hacían hincapié en la deuda de Leonardo con manuscritos ingenieriles anteriores y lo colocaban en una segunda fila.

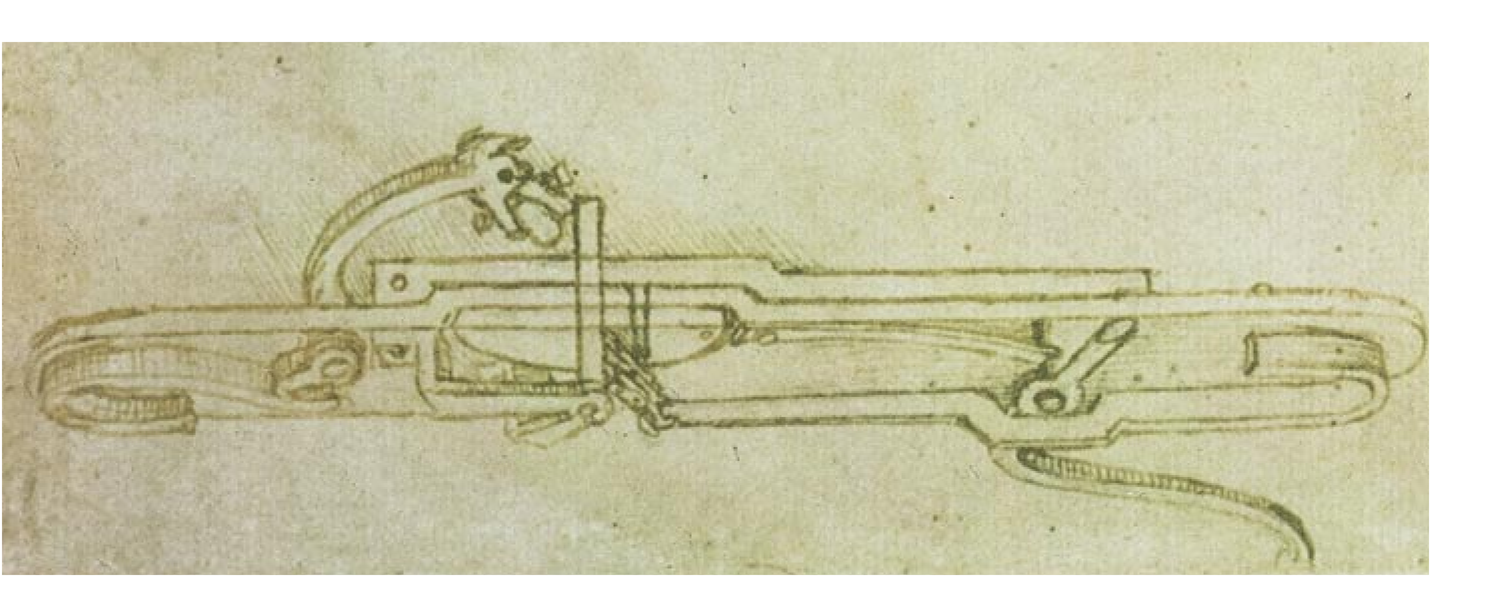
La reputación de Leonardo empezó a recuperarse en los años sesenta tras el descubrimiento y edición de los *Códices de Madrid*, otro mazo de cuadernos suyos. El director original de la colección (Ladislao Reti), su sucesor Augusto Marinoni y el coleccionista millonario Bern Dibner hallaron en los cuadernos ejemplos de diseños y trabajos experimentales originales. Se encontraron, además, pruebas de que los artesanos de la época incorporaron en sus propios proyectos algunas de las ideas del maestro.

Pero no se ha resuelto la cuestión de si alguno de los inventos fundamentales de Leonardo se hizo real durante su vida. Quizá sí al menos uno, la llave de rueda.

La llave de rueda es un artilugio metálico que proporciona la chispa para prender fuego a sustancias inflamables, pólvoras sobre todo. Los encendedores de cigarrillos nos ofrecen ahora una versión moderna. Pero en tiempos de Leonardo, la llave de rueda se empleaba principalmente en armas ligeras —mosquetes, por ejemplo—, que podía transportar y disparar una persona sola. Constaban de tres partes esas armas: las tradicionales llave, caja y cañón. El largo cañón cilíndrico albergaba la pólvora y la bala y lanzaba el disparo al recibir fuego. La llave se alojaba



ción de la llave de rueda



en la parte posterior del cañón. La caja, por fin, era la pieza de madera del arma que mantenía unidas a las otras dos.

Algunos de los componentes de la llave de rueda se asemejan a los de una cerradura, lo que podría justificar su nombre. Una llave de rueda consiste en una rueda de acero con una cadena, la cadeneta, sujeta a su eje que la une a un potente muelle. Cadeneta y muelle dan cuerda a la rueda preparándola para el disparo, es decir, montan el arma. Una vez montada la rueda, un pestillo (a veces llamado fiador) la sujeta hasta que es liberada cuando se acciona el gatillo. La rueda, entonces, cuando empieza a girar, raspa sobre una piedra dura, por lo común pirita de hierro, fuertemente apretada contra la rueda merced a un segundo muelle. Durante el proceso, el calor generado por el frotamiento torna incandescentes las raspaduras. El borde superior del canto de la rueda encaja en un receptáculo con pólvora (la cazoleta) a través de una delgada ranura en la base del receptáculo. Luego, el calor de las chispas se encarga de cebar la carga de pólvora contenida en la cazoleta.

Algunos historiadores, apoyados en determinados dibujos de Leonardo, defienden que inventó la llave de rueda. Otros, que lo niegan, aducen que la fabricación documentada de llaves de rueda más antigua aconteció más al norte, en tierra alemana; Leonardo dibujaría su propia versión de la llave tras conocer las producciones germanas.

Hasta hace poco carecíamos de base suficiente para decidirse por un bando u otro. Las primeras ilustraciones germanas de llaves de rueda, de comienzos de los primeros años del siglo XVI, son de fecha bastante cercana a la de los dibujos de Leonardo; además, las referencias escritas a la llave, y también las pocas armas que quedan de la época, son de interpretación difícil. Pero un nuevo enfoque del problema ofrece pruebas de que el mérito del invento es de Leonardo, quien empezaría a trabajar en la llave de rueda en torno a 1493.

En particular, he analizado las llaves de rueda primitivas desde un punto de vista mecánico, con



1. EL DIBUJO DE UNA LLAVE DE RUEDA incluido en el *Codex Atlanticus* de Leonardo da Vinci (*parte superior de la página*) muestra una sección transversal a la altura del centro del eje de la rueda. Para preparar el disparo de un fusil equipado de llave de rueda (*arriba*), el pie de gato con la pirita se abate hasta que la piedra frote con la rueda, la cual está conectada con el muelle real mediante una cadena articulada, la cadeneta. Cuando se acciona el gatillo, se libera el pestillo de retenida y la rueda comienza a girar rascando la piedra y echando chispas.



2. ESTOS DIBUJOS del *Codex Atlanticus* muestran dos tipos de componentes de la llave de rueda: muelles helicoidales y varias cadenetas articuladas, visibles en tinta borrosa exudada de la otra cara. Parece que Leonardo se interesó en los muelles helicoidales porque abultan menos que los muelles de ballesta, comunes en su época. De un lado a otro de la orilla superior de la página, da Vinci dibujó una serie de cinceles en V cuyos ángulos se hacen más abiertos yendo de derecha a izquierda (el zurdo Leonardo escribía de derecha a izquierda). Una vista lateral del cincel, el siguiente de la serie, con la V en la parte inferior de la herramienta, se muestra abajo a la derecha, donde parece estar tallando el borde de un círculo (posiblemente una rueda de llave de rueda). El autor ha empleado cinceles similares para recrear los surcos (*recuadro*) que comúnmente aparecen en los cantos de las llaves de rueda primitivas.

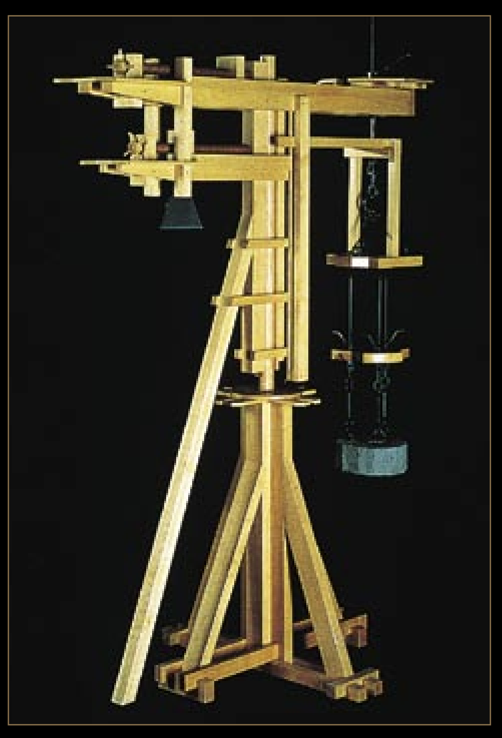
atención especial a la forma de cada componente. Parece que da Vinci utilizó componentes procedentes de otras máquinas en las que había trabajado en los veinte años anteriores a esa última fecha (cerraduras) y las reunió de un modo esencialmente nuevo para crear la llave de rueda.

VERNARD FOLEY enseña historia de la ciencia y la técnica en la Universidad de Purdue. Es un convencido de la influencia de la técnica sobre la ciencia básica. En su opinión, la reproducción real de máquinas que se construyeron en el pasado nos enseña a conocerlo con mayor profundidad.

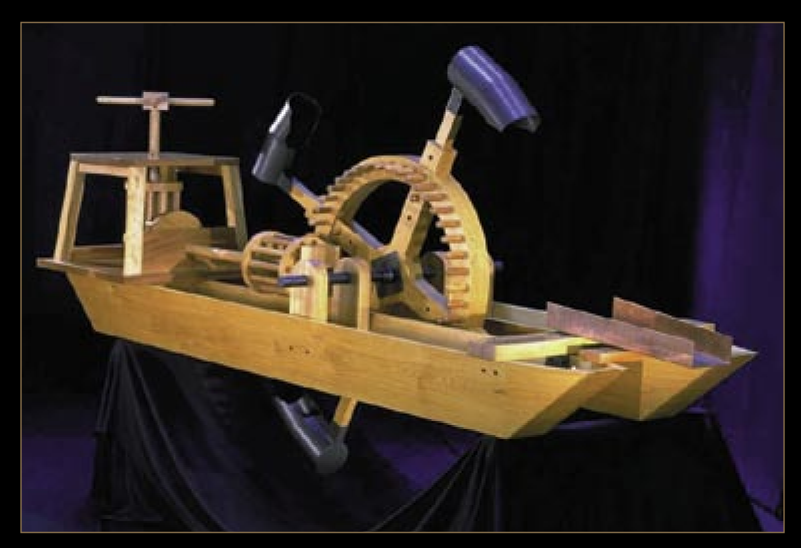
Empecemos considerando una página del *Codex Atlanticus*, otra compilación de los manuscritos de Leonardo, que actualmente se conserva en Milán. Esa página contiene dibujos de las cadenetas y los muelles que se encuentran en las llaves de rueda. Todos los especialistas en da Vinci concuerdan en que esos esbozos prueban que conocía el mecanismo. La página incluye también imágenes de cinceles en V para la talla de madera, que evidentemente Leonardo trataba de adaptar a la labra de metales.

Merece la pena detenerse en los cinceles dibujados por Leonardo. Su forma en V habría producido un surco con esa figura (similar a los hilos de la rosca de un tornillo) sobre el canto de la rueda. Los cantos de las ruedas de las llaves más primitivas tenían varios surcos de ésos. Además, los cantos solían llevar un segundo conjunto de ranuras muy estrechas, labradas con lima, que atravesaban los hilos del canto; se espaciaban de suerte tal, que semejaban un minúsculo conjunto de dientes como los de una sierra circular. A primera vista, el diseño adolece de una complejidad innecesaria, pues cada hilo tendría que haberse tallado también en la cazoleta. Además, los surcos transversales pueden obstruir una buena ignición.

No obstante, las ventajas de ese diseño se evidenciaron cuando ensayé algunas ruedas de muestra y descubrí que los dientes eran realmente los de una sierra o una cuchilla de metales rotatoria. De hecho, la rueda puede tallarse su propia ranura en el fondo de la cazoleta de la pólvora, asegurando un ajuste sin huelgo. Tal encaje cerrado es decisivo, pues el polvorín (la pólvora de cebo) es de grano finísimo y, si el arma sufriera sacudidas (por ejemplo, cuando alguien la llevara a caballo), el polvo podría derramarse a través de cualquier intersticio entre la rueda y la cazoleta. Aunque esas sierras del siglo XV son lentas (tardan varias horas en hacer lo que una cuchilla moderna ejecutaría en segundos) su precisión no tiene nada que envidiar a la de la técnica moderna. Man-



Leonardo da Vinci
GRUA DE PIVOTE DE BRUNELLESCHI



Francesco di Giorgio
EXTRACTOR DE FANGOS

Tecnología renacentista

Tras las escalas en París y Florencia, la exposición internacional *Maravillas mecánicas: La invención en la era de Leonardo* inauguró su estancia neoyorquina en octubre de 1997 en la Liberty Street Gallery del World Financial Center. La exposición, que durará hasta marzo de 1998, presenta 50 modelos reales en funcionamiento de las máquinas diseñadas (pero no todas construidas en su tiempo) por varios inventores destacados del Renacimiento. Mostramos aquí algunos de los inventos recreados para la exposición.

La redacción



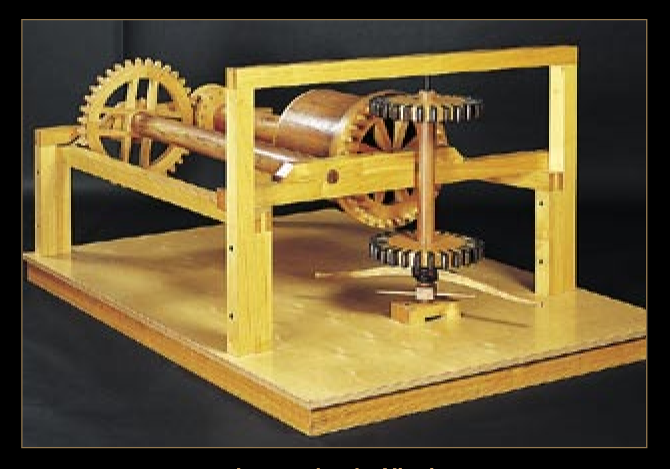
Leonardo da Vinci
GATO DE HUSILLO
CON COJINETE DE METAL
ANTIFRICCION



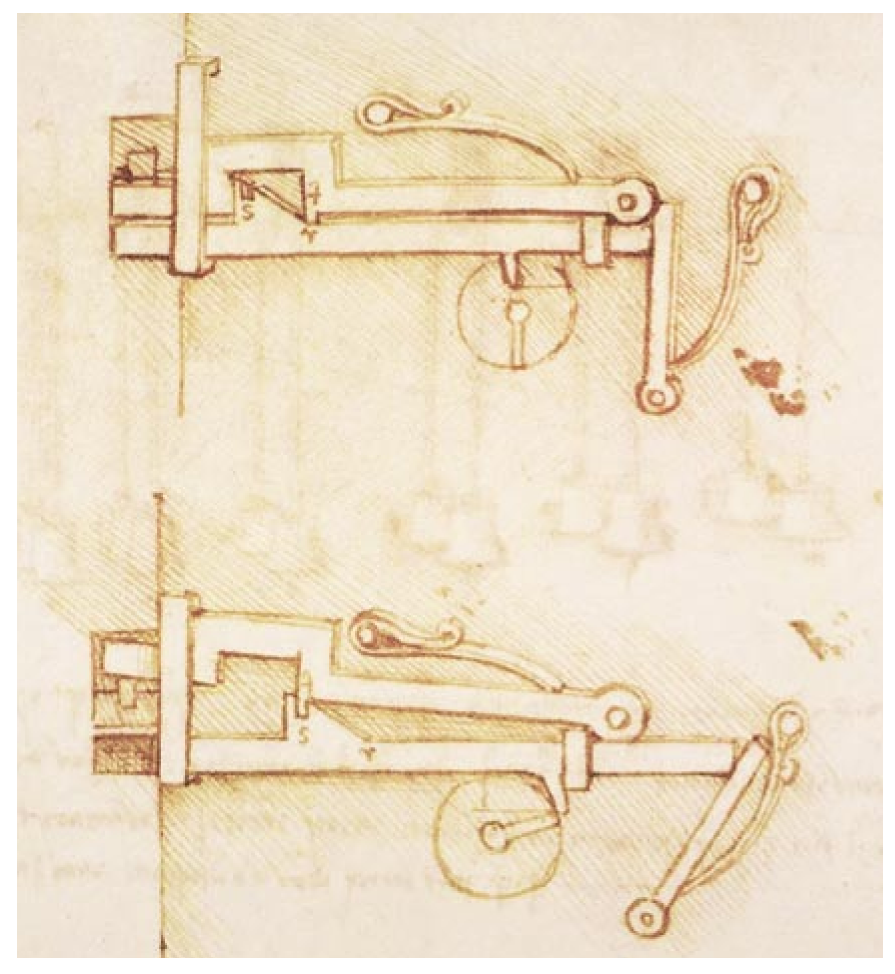
Francesco di Giorgio
MOLINO DE RUEDA HIDRAULICA
HORIZONTAL



Leonardo da Vinci
COJINETE DE BOLAS ANTIPRESION



Leonardo da Vinci
TORNO DE TRES VELOCIDADES



3. LOS DIBUJOS DE CERRADURAS hallados en el *Codex Madrid* datan de cuando Julio el Tudesco trabajaba en Milán con Leonardo. Esos dibujos muestran barras de enganche diseñadas para mantener abierto el cerrojo contra la presión de muelles de cierre muy potentes. Tales barras se asemejan a los fiadores empleados en la llave de rueda. Ambos tipos de barras llevan resaltos triangulares con entallas y unas espigas menores que traban al mecanismo una vez montado.

tienen tolerancias inferiores a 0,3 milímetros.

Antes de este descubrimiento, el primer uso de cuchillas para metales rotatorias se remontaba a los años cuarenta del siglo XVI, bastante después de la muerte de Leonardo. Sin embargo, parece que es a éste a quien hemos de atribuirle el mérito de su desarrollo. Todo un logro si tenemos en cuenta que la fresadora moderna, que emplea esos útiles, es una de nuestras máquinas herramientas.

El trabajo de Leonardo con muelles, cadenas y cinceles prueba que conocía los componentes de la llave de rueda. Pero, ¿cuándo los integró e inventó el útil? En 1493 Leonardo tomó a su servicio a Julio el Tudesco, quien le sirvió varios años como técnico en su estudio milanés. Ignoramos cuándo abandonó Julio el taller de Milán; probablemente antes de 1500. Las anotaciones de Leonardo indican que la especialidad de Julio incluía cerraduras y otros mecanismos accionados por muelles, tales como ballestas y cizallas.

Los dibujos de Leonardo de cerraduras para puertas y cofres de la misma época son un reflejo casi fiel de las hechuras de las piezas de la llave de rueda. Sugieren esas similitudes que la llave de rueda fue desarrollada por Leonardo y Julio, mientras trabajaban juntos. Mediados los años noventa del siglo XV Julio pudo haber regresado a su patria llevándose el diseño, lo que explicaría por qué la invención llegó al norte de Europa en los primeros años de la centuria siguiente.

Claude Blair descubrió recientemente nuevas pruebas, muy valiosas, sobre da Vinci y la invención de la llave de rueda. Según este historiador, en Cividale la manufactura de llaves de rueda comenzó al menos hacia 1510 y probablemente varios años antes. Esa ciudad pertenece a la región de Friuli, en el norte de Italia. Leonardo trabajó en Friuli durante un tiempo, supervisando fortificaciones no más tarde de 1500, lo que se adelanta en el tiempo a cualquier reivindicación germana.

En mis investigaciones sobre los orígenes de la llave de rueda no me he limitado al reconocimiento de la prioridad del invento; he abordado también el uso que hacía de ideas de las máquinas existentes y remodelaba los componentes para producir nuevos ingenios. Ese proceso se aprecia con nitidez observando más detenidamente sus dibujos de cerraduras y bicicletas.

Para abrir sus cerraduras de puertas y cofres contra la presión de sus fuertes muelles, Leonardo las diseñaba a veces con las llaves de amartillar, que eran independientes de las llaves necesarias para destrabar el mecanismo y servían para comprimir los muelles de la cerradura. Esas llaves solían tener la forma de una tuerca de aletas o de mariposa, a menudo con agujeros en las alas. Algunas de las llaves de rueda primitivas portaban llaves de ese tipo enchavetadas a la rueda para amartillar la llave. Otra similitud entre las cerraduras de Leonardo y las llaves de rueda puede observarse en los pestillos que mantienen tensos a los muelles. En sus dibujos, los pestillos tanto de las cerraduras [*véase la figura 3*] como de las llaves de rueda están formados por una barra con un saliente triangular entallado en un lado y una pequeña espiga adicional.

Leonardo trabajó también en el diseño de la bicicleta durante la década postrera del siglo XV. Algunas de sus cadenas articuladas y mecanismos de freno vuelven a aparecer en sus llaves de rueda. Un tosco bosquejo hallado en sus cuadernos ha sido atribuido a uno de sus alumnos, pero se cree que refleja el trabajo anterior de da Vinci en torno a la bicicleta y sus piezas. Respecto a este dibujo hay algunas dificultades, en particular con los pedales, el sistema de guiado y el mecanismo de la cadena.

Con varios de mis antiguos alumnos en la Universidad de Purdue (Edward Blessman, Jim Bryant y Kyle Datesman) hemos analizado más dibujos (de la década de 1490 y de la propia mano de da Vinci) que nos

4. ENGRANAJES Y CADENAS (parte superior de la ilustración, que procede del *Codex Madrid*) son muy similares a las cadenetas que unen el eje y el muelle real en las llaves de rueda. Kyle Datesman, ex alumno del autor, ha construido un modelo real de bicicleta (*recuadro superior*) integrando varios componentes de Leonardo que figuran en sus cuadernos. Esos frenos funcionan como los modernos frenos de contrapedal, o de piñón libre, que permiten que la bicicleta ruede sin pedalear pero sin impedirle al viajero que se detenga. La forma de los frenos de cinta reaparece en las llaves de rueda primitivas (*recuadro inferior*).



permitieron reconstruir un complejo sistema de guiado de su bicicleta. Dos páginas del *Codex Madrid* aportan componentes de la dirección y diseños experimentales de la cadena. Además, Leonardo dibujó lo que parece ser un juego de frenos de contrapedal, lo que permitiría a su bicicleta rodar sin pedalear. Vale la pena resaltar que tanto los mecanismos de la cadena como el muelle de frenado de su bicicleta reaparecen en sus primeras llaves de rueda.

La invención de la llave de rueda fue un logro realmente trascendental. Las anteriores llaves de fusil (o sea, la llave de mecha) se basaban en una fuente de calor externa, tales como un ascua incandescente o una mecha encendida, para prender la pólvora. Tras la aparición de la llave de rueda, las armas podían esconderse y sin embargo estar listas para la acción al instante, sin necesidad de pausas para encender una mecha. Ese avance hacia fusiles de manejo más cómodo alteraría para siempre el papel social de esas armas.

El primer disparo accidental documentado de un fusil (suceso propiciado por la invención de la llave de rueda) ocurrió en 1515 en la ciudad de Constanza, según el relato original de Wilhelm Rehm, escritor alemán de la época. Un tal Laux Pfister contrató a una prostituta y "cuando ella estaba con él en una pequeña estancia, él tomó en sus manos un fusil cargado; trasteó con la llave y, al oprimir el mecanismo de fuego, se encendió solo y la pieza se descargó". Alcanzó a la mujer en el mentón. Como castigo, tuvo que pagar todas las medicinas de la mujer y dotarla de una renta fija anual durante el resto de su vida.

El creciente número de fusiles de llave de rueda esgrimidos por salteadores de caminos y otros bandidos indujo a las autoridades a prohibir la manufactura y utilización de llaves de rueda. Pero los armeros y los usuarios de armas de fuego esquivaban esas leyes. A la larga, los esfuerzos para controlar las armas se revelaron insuficientes. El precio, la fiabilidad y la demanda de armas con llave de rueda y otros factores externos determinaron el modo en que se emplearon esos ingenios.

En los siglos transcurridos desde los días de Leonardo, los avances en la fabricación de armas han influido en otros campos, siendo seguramente la más notable de las contribuciones las técnicas de la producción en masa con piezas intercambiables. Desde inicios tan humildes como adaptar una rueda a una cazoleta de pólvora, mucho han cambiado las cosas, y la pregunta de Leonardo de si algo se había realizado puede desde luego contestarse que sí.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LEONARDO DA VINCI UND DAS FAHRRAD. Vernard Foley, Edward R. Blessman y James D. Bryant en *Technikgeschichte*, vol. 50, n.º 2, págs. 100-128; 1983.

LEONARDO, THE WHEELLOCK, AND THE MILLING PROCESS. Vernard Foley, Steven Best, David Cassidy y F. Charles Logan en *Technology and Culture*, vol. 24, n.º 3, págs. 399-427; julio 1983.

THE INVENTION OF THE WHEELLOCK. Vernard Foley en *Journal of the Arms and Armour Society*, vol. 11, n.º 4, págs. 207-248; 1984.

NEW LIGHT ON THE EARLY HISTORY OF THE WHEELLOCK IN ITALY. Claude Blair en *Waffen und Kostümkunde*, vol. 37, n.os 1-2, págs. 27-52; 1995.

Shawn Carlson

Una centrífuga de cocina

Los bioquímicos siempre me han asombrado. Valiéndose de unos métodos directos y económicos, se las ingenian para desentrañar numerosos misterios de la naturaleza. Y aunque en el curso de los últimos diez años hemos asistido a la aplicación de nuevas y potentes técnicas (y caras), los descubrimientos siguen realizándose por unos medios perfectamente al alcance de cualquier aficionado tenaz. Lamentablemente, la bioquímica es un campo hasta ahora poco explorado por los investigadores aficionados, y creo saber por qué: muy pocos tienen acceso a una centrífuga, la herramienta clave de cualquier bioquímico que se precie.

En una centrífuga se hacen girar rápidamente varios tubos de ensayo llenos de una suspensión líquida cuyos componentes deseamos separar. Como los pasajeros de un automóvil que efectúe un viraje a toda velocidad, toda partícula suspendida dentro de un tubo es lanzada hacia afuera por su propia inercia. Los bioquímicos suelen aprovechar ese efecto añadiendo a la solución alguna sustancia que provoque la precipitación de determinados componentes. Para purificar proteínas, por ejemplo, se provoca el cambio con un ácido débil o una base (vinagre o bicarbonato sódico o potásico). Las elevadas "fuerzas g" que así genera la centrífuga no tardan en causar la precipitación de las partículas sólidas.

No hay otro procedimiento capaz de aislar rápidamente cantidades importantes de productos bioquímicos. Por tanto, si alguien se propone extraer bacterias cultivadas de su caldo de incubación, purificar proteínas o aislar anticuerpos, necesita una centrífuga. Pero los modelos profesionales no están al alcance de un bolsillo medio.

Para salvar ese obstáculo financiero, Charles Carter, bioquímico aficionado y empresario innovador de London (Ontario), diseñó una centrífuga barata y fácil de construir. Gracias a su ingenio, cualquier aficionado puede construirse una por 3000 pesetas en el curso de una tarde, empleando una vieja mezcladora de cocina, un pequeño accesorio de tubo de plástico y un recipiente de plástico para guardar alimentos. Carter hizo su prototipo partiendo de una mezcladora de marca Osterizer, pero su técnica es aplicable a cualquier marca y modelo.

La centrífuga de Carter (o más correctamente, "microcentrífuga", pues emplea tubos de plástico miniatura para las muestras) se compone de tres partes: una base motorizada, un cilindro interno rotatorio con los tubos de las muestras, y una pantalla externa protectora del veloz movimiento interior. Antes de poner manos a la obra hay que hacerse con un juego de tubos para muestras.

La mayoría de las mezcladoras tienen una pieza de plástico de forma circular en la cara superior de la base. Se sierra y se matan los cantos con lija. Móntese luego el protector empleando un recipiente plástico para alimentos, de al menos 20 centímetros de diámetro por 10 de alto. Abrase un orificio ancho en el centro de la tapa y péguese boca arriba a la base con cola, de suerte que el eje rotatorio asome por el orificio. Hay que asegurarse de que no entre pegamento en contacto con las piezas rotatorias, ni obstruya las entradas de aire, que facilitan la refrigeración del motor.

El rotor de la centrífuga se fabrica con un tapón hembra de PVC,

Una vieja mezcladora puede transformarse en una económica centrífuga casera para experimentos biológicos

un tubo corto de plástico con un extremo cerrado. En la ferretería compraremos uno que mida unos diez centímetros de diámetro. El plástico tendrá un grosor mínimo de 0,3 cm y será rígido e inflexible. Abriremos un orificio a media altura del costado del tapón empleando brocas de diámetro creciente hasta que el orificio alcance la anchura de un tubo miniatura. Repetiremos el proceso tres veces más para crear un total de cuatro orificios regularmente espaciados en el perímetro.

El eje del motor debe estar alineado directamente con el centro de masa del tapón, que podría no coincidir con su centro geométrico. Para hallar el punto correcto donde taladrar, se cuelga el tapón de un trozo de hilo corto de modo que su superficie plana penda en ángulo recto con el suelo. El centro de masa se halla en algún punto de la recta que cae desde el punto de suspensión. Para determinar exactamente dónde taladrar, cúbrase el hilo de una plomada de carpintero con yeso de color, que debe alinearse con el otro hilo del que cuelga el tapón de PVC. Acercaremos con cuidado, poco a poco, el hilo de la plomada sin rozar la superficie plana del tapón. Si sujetamos el hilo en posición exactamente debajo del tapón y luego lo pulsamos de modo que golpee levemente a la superficie plana, el hilo dejará una huella recta de yeso que pasa por el punto donde hay que taladrar. Repítase esta operación al menos dos veces más, colgando el tapón desde otros puntos del costado. Las distintas huellas de yeso se cortarán entonces en el punto donde debe abrirse el orificio.

A continuación, debe taladrarse en el punto hallado, asegurando que el orificio sea vertical. Nada más adecuado que una taladradora de columna; con buen pulso nos sirve también una taladradora eléctrica manual. Los ejes de muchas mezcladoras antiguas tienen unos adaptadores metálicos de sección cuadrada que no acaban de encajar en un orificio redondo. Carter se limitó simplemente a abrir un orificio lo bastante largo para acomodar el adaptador cuadrado. Seguidamente, depositó abundante pegamento en el faldón metálico de la base del adaptador, oprimió el tapón sobre sí hasta que se asentó, y por último rellenó con abundantes pasadas de pegamento los intersticios entre el adaptador y el tapón, dejando a secar el conjunto una noche.

Según sea el modelo de mezcladora empleado, quizá debamos abrir un orificio amplio en la tapa base para que acepte un poderoso adaptador plástico del eje del motor. En ese caso, recurriremos a una broca hueca cilíndrica para ampliar el primer orificio que abrimos. Luego péguese la tapa base al adaptador de plástico empleando un nivel de burbuja para asegurarse de que la tapa no queda inclinada. Algunos adhesivos dan mejor resultados que las colas.

Cuando se seque el pegamento, habrá llegado el momento de comprobar el equilibrado de la base giratoria. Instalaremos un tubo de muestra vacío en cada uno de los cuatro agujeros e inmediatamente pondremos en marcha el motor a su velocidad más baja. (Cuidado con los dedos.) Si el aparato traquetea y retiembla por encima de la mesa, habrá que hacer algunos ajustes. Carter tuvo la idea acertada de retirar los tubos uno a uno y repetir la prueba. Si al retirar un tubo se reducen las sacudidas, procuraremos eliminar algo de material del mismo lado de la base. Con cuidado pasaremos la lima por el borde de la base, justo encima del tubo en cuestión. No cejaremos en el empeño hasta comprobar que la base gira sin demasiadas vibraciones.

Podríamos llevar también el aparato a un taller de reparación de motores eléctricos, donde, por poco dinero, algún técnico nos señalará la velocidad de rotación para cada posición del mando de la mezcladora. (¿Qué es más rápido, "puré" o "picadillo"?) Con esa información, se podrá calcular la aceleración exacta que sufren las muestras mediante la fórmula que damos en recuadro.

Para probar la centrífuga, llenaremos dos tubos limpios con un mililitro de leche cada uno. Completaremos uno con agua y el otro con vinagre (5 por ciento de ácido acético). Colóquense las muestras en agujeros opuestos de modo que las tapas queden dentro de la base rotatoria de PVC con las bisagras hacia abajo. (Nunca debe funcionar la centrífuga con líquido en sólo un tubo, pues se desequilibraría.)

Cerremos con la tapa protectora de plástico. Hagamos funcionar el aparato durante tres minutos a su velocidad más baja. Cuando el rotor se pare, retírese la tapa, extráiganse los tubos y obsérvese su interior: el blanco de la leche se ha depositado en el fondo del tubo que contenía el vinagre. Ello se debe a que el ácido ha rebajado el *p*H, provocando la precipitación de las moléculas proteicas de caseína, que confieren a la leche su característico color blanco. Al vaciar la solución restante, quedará un trozo sólido de proteína pura. Acabamos de entrar en el extraño mundo de la bioquímica.

Para medir la aceleración

La aceleración, a, que sufre un objeto cuando describe una trayectoria circular de radio r a una frecuencia f es

$$a = (2\pi f)^2 r$$

La aceleración debida a la gravedad (aproximadamente 9,8 metros/segundo en la superficie terrestre) ofrece una unidad de aceleración práctica: "g". Las velocidades de los motores eléctricos suelen darse en revoluciones por minuto y el radio (hasta la punta de los tubos de las muestras) es más cómodo expresarlo en centímetros. Por eso, la anterior expresión se convierte en

$$a_g = \left(2\pi \frac{f/_{min}}{60\ ^{seg}/_{min}}\right)^2 \frac{1}{9{,}80\ ^{m}/_{seg^2}} \frac{r_{cm}}{100\ ^{cm}/_{m}}$$

y ésta, simplificada, queda

$$a_g = 1{,}12 \times 10^{-5} f^2 r$$

(con f en revoluciones por minuto y r en centímetros). Esta fórmula sirve para convertir las velocidades de rotación de las posiciones del mando de la mezcladora en el número de unidades g que experimentan las muestras.

Para más información acerca de este y otros proyectos científicos para aficionados, visite la página Web de la Society for Amateur Scientists en www.thesphere.com/SAS/. También puede escribir a la sociedad a 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117, llamar al 619-239.88.07 o dejar un mensaje en el 800-873.87.67.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Burbujas: simples, múltiples y dobles

El dodecaedro consta de 20 vértices, 30 aristas y 12 caras, cada una de cinco lados. Pero, ¿qué cuerpo geométrico tiene 22,9 vértices, 34,14 aristas y 13,39 caras, de 5,103 lados cada una? ¿Será, tal vez, alguna rebuscada superficie fractal? No, se trata de una figura ordinaria, conocida, familiar, que fácilmente hallaremos en casa. Búsquese, por ejemplo, cuando se beba un refresco o una cerveza, al ducharse o al lavar los platos.

He hecho trampa, desde luego. Tanta existencia tiene ese curioso cuerpo en una casa normal como pueda habitarla una familia típica de 2,3 hijos. Solamente existe en promedio. Y no es un sólido macizo, sino una burbuja. La espuma contiene millares de burbujas, apiñadas a modo de diminutos poliedros irregulares; el número medio de vértices, aristas y caras de estos poliedros es de 22,9, 34,14 y 13,39, respectivamente. De darse la burbuja promedio, se parecería a un dodecaedro, aunque sería un poquito más así.

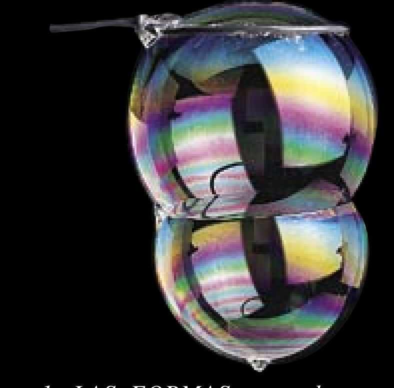
Las burbujas han sido motivo de fascinación desde que se inventó el jabón. Pero las matemáticas de las burbujas y del jabón no se pusieron en marcha hasta los años treinta del siglo pasado, cuando el físico belga Joseph A. Plateau empezó a sumergir marcos de alambre en soluciones jabonosas, con resultados que le causaron asombro. Y a pesar de los 170 años de investigación transcurridos, no se ha conseguido una descripción matemática de ciertos fenómenos interesantes observados por Plateau, no digamos ya una explicación rigurosa.

Hallamos un ejemplo notorio en la conjetura de la burbuja doble, que afirma que en la fusión o coalescencia de dos burbujas la figura resultante consta de tres superficies esféricas. En 1995, Joel Hass, de la Universidad de California, y Davis y Roger Schlafly, de la compañía Real Software, anunciaron una demostración de esta conjetura para el caso particular de que las dos burbujas encierren el mismo volumen. (El caso de que sus volúmenes sean distintos está todavía pendiente.) Conocemos ya, sin embargo, otros muchos fenómenos descubiertos por Plateau. Los experimentos con películas jabonosas han ayudado en numerosas ocasiones a los matemáticos a desarrollar demostraciones rigurosas de teoremas geométricos importantes.

En 1829 Plateau había llevado a cabo un experimento óptico que exigía mirar directamente al sol durante 25 segundos; sufrió una lesión ocular y acabó por quedar ciego. Pese a ello, continuó efectuando aportaciones de importancia a la rama de las matemática más intensamente visual, la geometría del espacio.

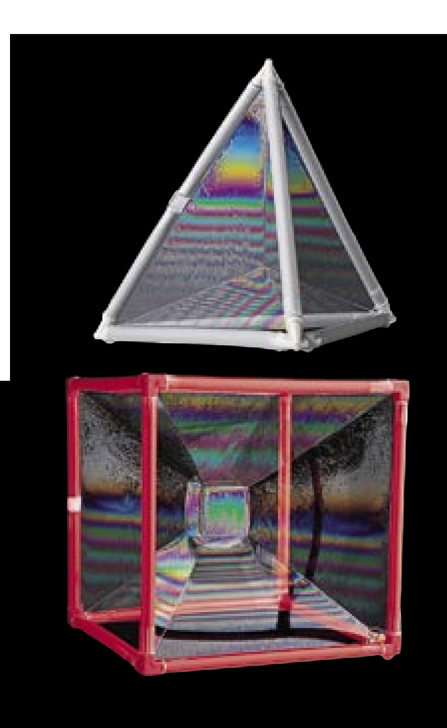
Las burbujas y las películas jabonosas constituyen ejemplos de una noción de inmensa importancia matemática, a saber, la noción de superficie minimal. Las superficies minimales están relacionadas con las burbujas porque la energía puesta en juego por la tensión superficial en una película jabonosa es proporcional a su área. A la naturaleza le gusta que la energía sea mínima, por lo que las burbujas buscan hacer mínima su área. Por ejemplo, la superficie de mínima área que encierra un volumen dado es una esfera; no es otra la razón de que las pompas de jabón sueltas presenten forma esférica.

Una película jabonosa es tan delgada —su espesor es del orden de un



1. LAS FORMAS que adoptan dos burbujas adosadas que encierran distintos volúmenes siguen planteando un difícil problema matemático, pendiente de solución





2. LA SUPERFICIE DE AREA MINIMA es siempre la correspondiente a una burbuja. En consecuencia, la película jabonosa que pone en contacto dos círculos paralelos adopta la forma de una catenoide. Un tetraedro y un cubo engendran complicadas disposiciones de superficies casi planas que forman, al cortarse, ángulos característicos

micrometro— que se parece mucho a una superficie matemática infinitamente delgada. (El problema de desplazar burbujas es harina de otra costal, porque la fuerzas dinámicas pueden hacerlas bambolearse en toda clase de fantásticas formas.)

De no estarle impuestas ciertas limitaciones, el área de una superficie minimal sería cero. Las restricciones más corrientes consisten en que la superficie ha de encerrar cierto volumen, que su superficie haya de encontrarse sobre una superficie o una curva dada, o ambas cosas. Por ejemplo, una burbuja que se forme sobre la superficie plana del tablero de una mesa, adoptará de ordinario forma hemisférica, por ser ésta la superficie de área mínima que encierra un volumen dado y cuya frontera se encuentra contenida en un plano (la superficie del tablero).

A Plateau le interesaban sobre todo superficies cuya frontera fuese una curva dada de antemano. En sus experimentos, la curva estaba representada por un trozo de alambre doblado en la forma deseada o por varios alambres unidos entre sí, creando un marco. ¿Qué forma tendría, por ejemplo, una superficie minimal cuya frontera comprenda dos círculos paralelos idénticos? A primera vista se podría pensar que sería un cilindro. Pero no es así. Leonhard Euler demostró que la verdadera superficie minimal que posee tal contorno es una catenoide, superficie que se obtiene al hacer girar una curva en U alrededor de un eje que pasa por los centros de los dos círculos.

La catenaria es la curva que adopta una cadena pesada y uniforme que pende de dos ganchos situados a la misma altura. Se parece a la parábola, pero carece de su esbeltez. El teorema de Euler podemos comprobarlo experimentalmente construyendo dos aros circulares de alambre con asas, a modo de redecillas para peces. Sosteniéndolos juntos, los sumergimos en un bol de solución de jabón o detergente, los separaremos poco a poco y nos aparecerá la catenoide con toda su refulgente belleza.

Una de las más célebres descripciones de las películas jabonosas puede verse en el clásico *¿Qué es la matemática?*, de Richard Courant y Herbert Robbins. Relatan en él algunos de los experimentos originales de Plateau, en los que sumergía marcos de alambre con las formas de los poliedros regulares. El caso más sencillo, que no exponen, corresponde al de un marco tetraédrico, una figura con cuatro caras triangulares y seis lados iguales. En este caso, la superficie minimal tendida entre las aristas consta de seis triángulos, que concurren todos en el vértice del tetraedro.

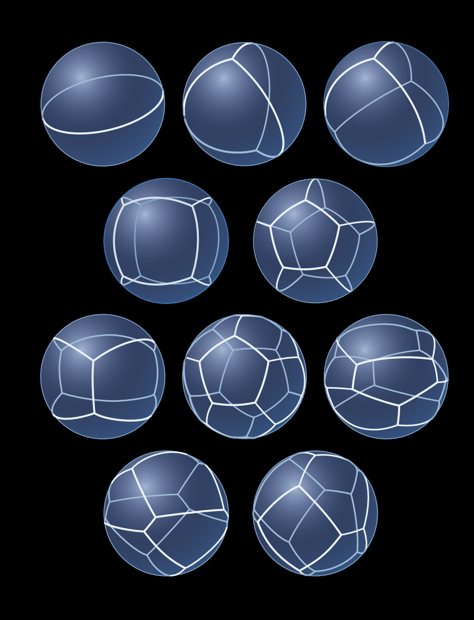
Un marco cúbico da lugar a una disposición más complicada, que consta de 13 superficies casi planas. El caso del tetraedro está ya plenamente comprendido, pero el análisis completo del ejemplo del cubo sigue eludiendo los esfuerzos de los matemáticos.

El marco tetraédrico pone de manifiesto dos características generales de las películas jabonosas, ya observadas por Plateau. A lo largo de las líneas que parten de los vértices del marco hacia el centro geométrico, las películas jabonosas concurren en ternas que forman ángulos de 120 grados en el punto de encuentro; en el punto central, las cuatro aristas forman al cortarse ángulos de 109 grados y 28 minutos. Los dos valores de estos ángulos son fundamentales en cualquier problema concerniente al encuentro de varias películas jabonosas. Los ángulos de 120 grados entre las caras y de 109º 28′ entre las aristas se presentan no sólo en los tetraedros regulares, sino también en cualquier disposición de películas jabonosas, siempre que no quede encerrado aire, o de haberlo, si las presiones sobre las dos caras de cada película son iguales (anulándose recíprocamente, por tanto).

Aunque las películas de espuma sean levemente curvas, cabe aproximarlas mediante caras planas: con esta aproximación, percibiremos los dos ángulos antedichos en el interior de una espuma, aunque no en el caso de películas situadas cerca de las superficies externas de la espuma. Constituye tal hecho la base de un curioso cálculo, que conduce a los extraños números con los que di comienzo a este artículo. Al aceptar que la película esté formada por muchos poliedros idénticos cuyas caras sean polígonos regulares con ángulos de 109º 28′ (lo cual es imposible, ¿pero qué importa?), podemos dar una estimación de los números medios de vértices, lados y caras de una espuma cualquiera.

La observación de Plateau concerniente al ángulo de 120º recibió en seguida estatuto matemático. La demostración suele serle atribuida al geómetra Jakob Steiner, en 1837, pero a éste le precedieron Evangelista Torricelli y Francesco B. Cavalieri, hacia 1640. Todos estos matemáticos estudiaron en realidad un problema similar para triángulos. Dado un triángulo y un punto en su interior, dibujemos las tres rectas que parten de tal punto hacia los vértices del triángulo, y sumemos sus longitudes. ¿Para qué punto será mínima la suma de las distancias? Respuesta: en el punto que haga que las tres líneas se corten en ángulos de 120º (siempre que ninguno de los ángulos del triángulo supere los 120º; en tal caso, el punto deseado es el vértice correspondiente). Cuando nos referimos a membranas jabonosas, el problema puede quedar reducido al de los triángulos intersecando las películas por un plano adecuado.

En 1976, Frederick J. Almgren, Jr., entonces en la Universidad de Princeton, y Jean E. Taylor, a la sazón en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostraron la segunda de las reglas de Plateau, la concerniente a los ángulos de 109º 28′. Empezaron considerando cualquier vértice en el que concurrieran seis caras a lo largo de cuatro aristas



3. LA REGLA DE PLATEAU para el ángulo entre cuatro aristas definidas por burbujas se demostró considerando las posibles formas en que pueden cortarse mutuamente seis superficies. Los vértices son encerrados en una esfera sobre la cual las caras se cortan en ángulos de 120 grados. Como vemos, hay sólo diez configuraciones que cumplan tal criterio; de ellas, sólo se reconoce viabilidad física a las tres primeras, por ser casos de área mínima

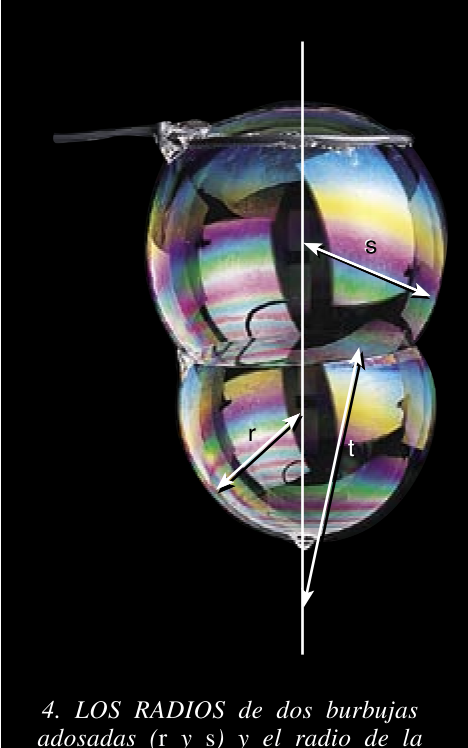
comunes. Ante todo, demostraron que la ligera curvatura que presentan la mayoría de las películas jabonosas puede ser despreciada, lo que permite suponer que las películas son planas. Estudiaron a continuación el sistema de arcos circulares formados por estos planos cuando intersecan una pequeña esfera centrada en ese vértice. Dado que las películas jabonosas son superficies minimales, estos arcos son "curvas minimales": su longitud total es la mínima posible. Por el análogo esférico del teorema de Torricelli-Cavalieri, estos arcos han de cortarse siempre de tres en tres y formar, al hacerlo, ángulos de 120º.

Almgren y Taylor demostraron que hay exactamente 10 configuraciones de arcos distintas que pueden satisfacer este criterio (*véase la figura 3*). Se preguntaron, en cada caso, si el área total de las películas del interior de la esfera podría reducirse deformando las superficies ligeramente o, tal vez, introduciendo nuevos pedacitos de película. Cualquiera de tales casos podría descartarse, pues no podría corresponder, en rigor, a una superficie minimal. Fueron exactamente tres los casos que sobrevivieron a este tratamiento, que son los tres primeros mostrados en la figura 3. Las correspondientes disposiciones de película son una película individual, tres que se reúnen a lo largo de una arista, formando 120º, o seis que se encuentran a 109º 28′; justo lo observado por Plateau.

Las técnicas detalladas necesarias para la demostración fueron más allá de la geometría, penetrando en el análisis matemático, el cálculo diferencial y sus más esotéricos descendientes. Almgren y Taylor se valieron de conceptos abstractos conocidos por medidas para considerar burbujas de formas mucho más complejas que las superficies lisas.

La regla de los 120º conduce a una hermosa propiedad de dos burbujas coalescentes. Se ha venido suponiendo desde hace largo tiempo que, cuando dos burbujas se fusionan, forman tres superficies esféricas, dispuestas como en la figura 4. Tal es la conjetura de la burbuja doble, de fundamento empírico. De ser verdadera, los radios de las superficies esféricas han de satisfacer una relación sencilla. Sean r y s los radios de las dos burbujas y sea t el radio de la superficie que les sirve de frontera común. En tal caso, la relación es

$$1/r = 1/s + 1/t$$



*4. LOS RADIOS de dos burbujas adosadas (*r *y* s*) y el radio de la superficie compuesta (*t*) obedecen a una relación sencilla*

Tal hecho está demostrado en el delicioso libro *The Science of Soap Films and Soap Bubbles*, utilizando tan sólo geometría elemental y la propiedad de los 120º.

Todo cuanto queda es demostrar que las superficies forman parte de esferas. Lo lograron Haas y Schafly en 1995, aunque solamente suponiendo que las burbujas sean del mismo volumen. En su demostración tuvieron que ayudarse de un ordenador, para calcular las 200.260 integrales asociadas a las diversas posibilidades en conflicto, ¡tarea que la máquina realizó en sólo 20 minutos! Pueden verse más detalles en "The Double Bubble Conjecture", por Frank Morgan, en *Focus* (Mathematical Association of America), vol. 15, nº. 6, páginas 6-7; diciembre de 1995.

Entre los hechos curiosos que se conocen del caso de volúmenes desiguales, destacaremos el siguiente: cualquiera que sea la configuración mínima de la doble burbuja, ésta ha de ser una superficie de revolución. El problema se reduce, pues, a un problema de sistema de curvas en el plano. Pese a tan simple planteamiento, la respuesta sigue siendo tan escurridiza como cuando Plateau, casi ciego, hundió su primer marco de alambre en un cuenco de agua jabonosa.

NEXOS

James Burke

¿Anda alguien por ahí?

Días atrás, nos divertíamos varios amigos en sobremesa inocente dando golpes con los dedos sobre el tablero y moviendo vasos. Ante esa excitación, alguien propuso —ya en harina— que indagáramos si Charles Darwin andaba merodeando por allí. Lo hicimos. Pero no se le vio. A todos nos resultaba familiar el misterio irresuelto sobre la autoría de la idea de evolución, y buscábamos ayuda.

¿Fue Darwin o fue Alfred Russel Wallace, autodidacta agrimensor y entomólogo aficionado? (En ocho años en el archipiélago malayo, Wallace cazó 125.660 especies de insectos.) En 1858, mientras estaba en Borneo, Wallace envió a Darwin algunas notas sobre el origen de las especies, y en menos de lo que se tarda en decir "yo lo vi primero", Darwin ya había publicado su obra auroral. Muchos sospecharon lo que el lector se puede imaginar. Por eso, deberíamos quizá haber intentado contactar directamente con Wallace. Al fin y al cabo fue una figura destacada del movimiento espiritista; declaró incluso que nunca se había encontrado con un solo medium que resultara un farsante.

Compartieron esta opinión otros eminentes científicos de la época, como Oliver Lodge, físico y profesor de temple. Lo mismo que a Wallace, a Lodge le interesaba de modo especial la transferencia de pensamiento. Es posible que se le conozca más por sus trabajos en otra forma de transmisión de mensajes, igualmente difícil de aprehender: las ondas electromagnéticas. Para abordarlas, recurrió a un pequeño tubo de limaduras de hierro. Cuando una señal de radio muy fina las atravesara se adherirían las unas a las otras y tendríamos de esta forma un detector. El artilugio de Lodge le allanó el camino a un tal Reginald Aubrey Fessenden, canadiense que en 1906 logró transmitir ondas de radio continuas, con las que se podían enviar mensajes de voz (por contra, Marconi en Italia y otros en otros lugares empleaban señales intermitentes).

Nada más difundirse la noticia, la United Fruit Company decidió ir por plátanos. Se tenía el sistema perfecto para que los trenes y barcos de las empresas fruteras llegaran al mismo sitio a la misma hora. Estos detalles tienen su importancia en el negocio de las bananas. Crecen tan deprisa, que pueden obtenerse varias cosechas al año, pero un crecimiento rápido lleva aparejada una maduración rápida, por lo que es recomendable que la fruta llegue al consumidor lo antes posible. Sé todo esto porque he leído un aburridísimo libro de Alphonse Candolle, que sucedió a su padre en la dirección del Jardín Botánico de Ginebra en el siglo XIX.

Candolle padre era buen amigo de otro científico de Ginebra llamado Horace Bénédict de Saussure, una eminencia de la geología. A él se le debe haber propuesto para la Tierra una antigüedad superior a los cinco mil años oficiales. Dilatación que le vendría de perlas a Darwin. (A Saussure le gustaba mucho el Mont Blanc y, como por entonces era tan famoso, los suizos acariciaron la idea de cambiar el nombre de la montaña en su honor. Pero "Mont de Saussure" no acaba de sonar igual.)



De Saussure tenía un pupilo predilecto, François Argand, al que introdujo en el círculo científico parisiense. En otoño de 1783 Argand ayudó a los Montgolfier en el vuelo de demostración de su globo ante la Academia Nacional de Ciencias. Un par de semanas más tarde, los dos hermanos substituyeron a patos y pollos por personas y tuvo lugar el primer ascenso en globo tripulado, para gran asombro y excitación de Benjamin Franklin, quien rápidamente volvió a los Estados Unidos, con una determinación: "si los franceses tienen globos, también los tendrá América". No se produjo nada reseñable. Aún más, en Francia Napoleón se opuso a este particular uso del aire caliente y el incipiente Cuerpo de Globos Francés se disolvió. Fueron malas noticias para un tal Nicholas Conte, su promotor, quien explotó y diseñó una nueva punta de lápiz. Pero esto ya es material para otro artículo.

Mientras tanto, en unos Estados Unidos en plena Guerra Civil resurgió el interés por la aeronáutica, personificado por el profesor Thaddeus Lowe (por alguna extraña razón los promotores americanos de los vuelos en globo recibieron ese tratamiento académico). Su carrera aérea, salpicada de altibajos, alcanzó su cumbre (como él mismo) el 2 de junio de 1862 cuando se alzó 610 metros por encima de la batalla de Chicahominy en su globo *Enterprise*. El londinense *Times* informó de que Lowe pudo detallar todos los movimientos de los ejércitos confederados a sus pies al jefe de la Unión (asimismo a sus pies), gracias a un telégrafo que transmitía a través de la soga que anclaba el globo a tierra.

El hombre que colaboró con Lowe en esta empresa fue George B. McClellan, general del ejército del Potomac. Un tipo listo, se dio cuenta del potencial de información que podían obtener Lowe y su barquilla. La otra cosa inteligente que hizo McClellan fue organizar un departamento de servicio secreto para el ejército, con la ayuda de un ex barrilero reconvertido en detective privado, al que ya había contratado antes de la guerra para vigilar la propiedad del Ferrocarril Central de Illinois, del que McClellan era vicepresidente. Si además añado que el abogado del ferrocarril era Abraham Lincoln, se podrá adivinar de quién se trata. Con amigos en tan altas esferas, Allan Pinkerton no halló trabas para abrir la agencia de detectives más famosa del país. Pinkerton cayó muy pronto en la cuenta de que los criminales siguen un *modus operandi*. Maestro del disfraz, tenían por libro de registro un *Quién es quién* de los bajos fondos que incluía entre los granujas a Jesse James, Butch Cassidy y Sundance Kid.

Pero el éxito más notable de Pinkerton se refiere a un grupo de terroristas irlandeses (anarquistas o radicales o lo que sea) conocidos como los Molly Maguires que operaban en la cuenca minera de carbón de Pennsylvania. Habían causado incendios, agresiones y asesinatos. Pinkerton decidió infiltrarse en la banda y en 1873 envió a James McParlan, perfectamente cualificado para el trabajo: irlandés, católico y osado. En muy poco tiempo, McParlan consiguió hacerlo demasiado bien: los Molly lo invitaron a participar en su escuadrón de asesinato. En su desesperación por evitarlo, McParlan convenció a los Molly de que era un borracho y empezó a beber. Y lo hizo de nuevo con tal exactitud que se volvió alcohólico irrecuperable, para morir, anónimamente, en Denver. Pero no antes de proporcionar a Pinkerton informes secretos semanales durante dos años que acorralaron a los Molly y condujeron a su captura y a varias ejecuciones.

La labor de McParlan no pasó, sin embargo, totalmente inadvertida. En 1914 se convirtió en el héroe internacionalmente aclamado de una novela titulada “El valle del miedo”. Bueno, en realidad se *debería* haber convertido en héroe de no haber sido porque el autor terminó por escoger otro nombre para el detective protagonista del libro. El internacionalmente famoso Sherlock Holmes se apropió en la ficción de las heroicidades de McParlan y, conociendo el destino del último, resulta irónico que “El valle del miedo” fuera también el último caso de Sherlock Holmes.

Después de esto, su creador, Sir Arthur Conan Doyle pasó a expresarse a través de un medio distinto: se sentó junto a una mesa y se dedicó a lo que yo estaba jugando la otra noche. Porque en 1914 Doyle dejó de escribir y continuó lo que Wallace y Lodge habían abandonado: se convirtió en una lumbrera de la Sociedad para la Investigación del Psiquismo.

Espero que este artículo transmita buenas vibraciones, sin que sea preciso tocar madera o cerrar los ojos.

Libros

Ciencia del XVII

Recuperada

Il Carteggio Linceo, por Giuseppe Gabrieli. Accademia Nazionale dei Lincei; Roma, 1996. **The Paper Museum of Cassiano dal Pozzo. Series B. Natural History. Citrus Fruit**, by David Freedberg y Enrico Baldini. Harvey Miller Publishers; Londres, 1997. **Science and Social Status. The Members of the Academie des Sciences, 1666-1750**, por David J. Sturdy. The Boydell Press; Woodbridge, 1995.

René Descartes. Le Monde, L'Homme. Introducción de Annie Bitbol-Hesperiès. Editions du Seuil; París, 1996. **Atomism and its Critics**, por Andrew Pyle. Thoemmes Press; Bristol, 1997. **Kontinuität und Mechanismus**, por Philip Beeley. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 1996.

Aspetti poco Notti della Storia dell'Anatomia Patologica tra '600 e '700, por Giorgio Weber. Leo S. Olschki Editore; Firenze, 1997. **Marcello Malpighi Anatomist and Physician**. Dirigido por Domenico Bertoloni Meli. Leo S. Olschki Editore; Firenze, 1997.

Hay momentos del pasado en que la ciencia redobla su pulso. Unas veces se trata de efemérides singulares, como el año 1543, que fecha la impresión de la astronomía copernicana y de la anatomía de Vesalio. En otras, el brillo perdura un siglo; así el de Galileo y Descartes, el de Kepler, Huygens y Newton. El progreso de esa centuria obedece a muchos factores que operan en sinergia. La matematización de las ciencias físicas cesa de ser un pío deseo. Se asientan la observación y la experimentación. Decaen los discursos cualitativos ante las sobrias mediciones cuantitativas, arranque de primeras leyes, mientras el ojo pegado a la lente descubre nuevos mundos.

Muchos esfuerzos se canalizan a través de sociedades, nacidas de impulsos más o menos espontáneos, siempre necesitadas del amparo de un mecenas. Madrugó en ese aspecto la Accademia dei Lincei. A ella podemos ahora asomarnos gracias a la publicación de la correspondencia mantenida por sus socios fundadores, *Il Carteggio Linceo*. La agudeza visual del lince constituyó todo un parámetro óptico en la filosofía mecanicista del siglo XVII; decían los microscopistas que con el refinamiento de sus oculares el hombre alcanzaría la vista del felino. Lynceus se llamaba también uno de los Argonautas.

En el verano de 1603, Federico Cesi (1585-1630), Francesco Stelluti, Anastasio de Filiis y Ioannes Heckius se asocian en academia, una más entonces entre las innúmeras que pululaban en Roma. Salvo el último, ninguno llega a la treintena. Más aún, su impulsor y protector, Cesi, no ha cumplido todavía los 18 años. Heckius era el único que se ganaba ya la vida, como médico de los Caetani y los Orsini. A diferencia de otros círculos más humanistas, les unía una fuerte inclinación por las matemáticas y las ciencias empíricas. A diferencia de otros también, se vieron muy pronto obligados a dispersarse.

En la diáspora forzada encontraron, paradójicamente, su fuerza. Heckius viajó por toda Europa anudando lazos de vinculación entre los Lincei y figuras representativas de la ciencia del continente: Caspar Bauhin, Thomas Mermann, Carolus Clusius, Mathias de l'Obel, Joannes Kepler, Mercurialis, Robin. Intercambian correspondencia científica —el complemento más rápido de los libros, al no existir publicaciones periódicas—, observaciones y experiencias, semillas y plantas, rarezas de los tres reinos. Libros. Heckius estuvo también en España, donde hizo acopio de un centenar de plantas desconocidas, es decir, no mencionadas por Clusius.

Cesi le sugiere a Stelluti, el matemático del grupo, que entre sus horas de estudio dedique algunas al conocimiento del árabe, pues en ese idioma se encuentran muchas obras valiosas. La academia se interesa por el paracelsismo y el arte de los metales, en particular, por la vitrificación y cristalización.

A ese período fundacional, inestable, sigue una etapa de asentamiento que perdura de 1610 a 1624, siendo Ioannes Faber secretario. Con el ingreso de Giovanni Battista della Porta y Galileo, la academia se reviste de autoridad y se extiende a Nápoles y Florencia. En el grupo toscano se enrolaron Filippo Salviati, Cosimo Ridolfi y Filippo Pandolfini; pertenecieron al enclave napolitano Filesio Costanzo della Porta, Nicola Antonio Stelliola, Fabio Colonna y Diego de Urrea Conca.

Urrea, de origen español, institucionaliza la relación de los linceos con nuestra patria a través de la corte de Nápoles. Si dejamos aparte el respaldo y la solicitud prestada a los trabajos de Galileo sobre las manchas solares, el principal esfuerzo de la Academia en cuanto tal giró en torno al *Rerum medicinalium Novae Hispaniae Thesaurus*, compendio realizado por Nardo Antonio Recchi de la flora y la fauna mexicana que se trajo a España Francisco Hernández.

En 1622 entra en la sociedad Cassiano dal Pozzo (1588-1657), quien había llegado a Roma diez años antes, tras haber estudiado derecho en Pisa y ejercido de juez en Siena. Acompañó a Francesco Barberini en sus viajes diplomáticos a París y Madrid. Su entusiasmo por las pinturas de Leonardo, que admiró en Fontainebleau, y por los dibujos de plantas y animales mexicanos, en el Escorial, habrían de inspirar posteriores proyectos suyos. Trabó amistad con Nicolas-Claude Fabri de Peiresc y otros. Con ese trasfondo de intensa vida intelectual se explica la gestación del "Museo Cartaceo", del que *Citrus Fruit* constituye una parcela.

A la muerte de Cesi en 1630, dal Pozzo compró sus instrumentos científicos, láminas y manuscritos. La importancia de esas láminas para la historia natural, repartidas hoy por las bibliotecas de Windsor, Kew y el Instituto de Francia, cuando no perdidas, trasciende toda ponderación. Reflejan, como ningún otro medio,

Ramita florecida de limonero, Citrus limon *(L.) Burma. La lámina, dibujada por Bincenzo Leonardi, perteneció a la colección de Cassiano dal Pozzo*


ddd

los avances registrados en paleontología, micología, botánica y zoología. Por si fuera poco, ese cartapacio singularísimo contiene las primeras ilustraciones realizadas con ayuda del microscopio.

Dal Pozzo tomaba parte activa en la búsqueda de especies y variedades que habrían de servir para dibujar las láminas con rigor científico. Dejaba a otros la redacción y publicación de los textos. Así lo vemos en las *Hesperides* de Giovanni Battista Ferrari, aparecidas en 1646 y donde se incluyen los cítricos. Dal Pozzo, en su solicitud de información a expertos y entidades de media Europa, enviaba un minucioso cuestionario sobre todo tipo de naranjas, cidros, limas, limones o pomelos: nombres de la especie y origen de los mismos; morfología de la hoja, flor y fruto; hábito de plantación; clima que necesita; textura de la tierra; abono; protección contra el frío y el calor; extensión y tiempo de poda; enfermedades; resistencia de la planta; si crecen en maceta o en el suelo; placeres y usos de la planta. Muestra un curioso interés por las formas teratológicas e híbridos, así como por los injertos.

Sociedad europea principalísima, la Académie des Sciences ha sido objeto de investigación incesante desde la irrupción de los clásicos Maury, Bertrand y Maindron hasta esta *Science and Social Status* de David J. Sturdy. Conocemos sus orígenes, fundación, organización y administración, su relación con la corona, la reforma de 1699, el esplendor del XVIII, el cierre de 1793 y su renacimiento a través del Instituto. Sturdy aborda la prosopografía de los cien primeros años en el marco de la estructura social del *ancien régime*.

A comienzos del XVII menudean en Francia tertulias animadas por abogados, clérigos y financieros. Esa tendencia cristalizó en París con la aparición de los *salons* literarios, que en ciencia y en filosofía tenían su contrapartida en los *cabinets*. Entre estos últimos gozó de fama continental y preparó la instauración de la Académie el del padre Marin Mersenne (1588-1648). La célula inicial de Mersenne estaba integrada por René Descartes, condiscípulo suyo en La Flèche, y Claude Mydorge, un brillante matemático que había estudiado con Viète. Se sumarían Pierre de Carcavi, Christiaan Huygens, Gilles Personne de Roberval, Desargues, los Pascal y el abbé Chambon. Con la incorporación de emigrados políticos ingleses, la tertulia se abrió al pensamiento baconiano. Buscaba Mersenne la síntesis entre teología y ciencias físico-matemáticas, con un espíritu de abierta tolerancia.

En el advenimiento de la Académie des Sciences influyó también el círculo de Henri-Louis Habert, señor de Montmor y fundador de la Académie Française. En 1657 Samuel Sorbière fue invitado por Montmor para redactar las reglas que deberían regir en las tertulias. Sorbière esbozó una lista de nueve artículos que definían el propósito, los procedimientos, la pertenencia y el fin intelectual de la academia. Las reuniones debían ceñirse a cuestiones científicas.

Pero la creación de la Académie des Sciences en 1666 se debe en puridad a Jean-Baptiste Colbert. Deseaba éste contar con el apoyo de Leibniz, Hartsoeker, Tschirnhaus, Hevelius, Viviani y Newton; se esforzó por retener en Francia, bajo patrocinio real, a Olaüs Roemer, Huygens y Jean-Dominique Cassini. Sólo el último se quedó de por vida. Colbert empeñó su poder omnímodo en la sociedad de *savants*. Pero le faltaba un modelo donde espejarse. La Accademia dei Lincei se había disgregado en 1657; la del Cimento fundada en Florencia ese año se debatía en una profunda crisis. De la iniciada Regia Sociedad de Londres nadie podía predecir su futuro. Colbert pidió borradores de estatutos y proyectos. Charles Perrault le presentó un esbozo de "Académie Generale", dividida en cuatro brazos: literatura (gramática, elocuencia, poesía), filosofía (química, botánica, anatomía, física experimental) y matemática (álgebra, astronomía, geometría). Estudió también el borrador que le preparó Huygens, una declaración de principios baconiana donde apelaba al uso de utillaje instrumental para la investigación.

Por fin, se estableció la Académie con pocas formalidades y sin ninguna alharaca. Entre mayo y junio de 1666 fueron convocados Adrien Auzout, Jacques Buot, Carcavi, Bernard Frénicle de Bessy, Huygens, Jean Picard y Roberval. En octubre se inauguró la sección de "filosofía". Se nombró secretario a Jean Baptiste du Hamel. En 1668, entró Jean Gallois, preste y director del *Journal des sçavants*, que la convertiría en órgano oficial de la institución.

Si en el método la Académie depende de Bacon, en filosofía, aunque no se adscribe a escuela alguna, resulta palmaria su inclinación hacia el mecanicismo cartesiano. René Descartes (1596-1650) se propuso elaborar un sistema de conocimientos que exigía, de entrada, hacer tabla rasa de las doctrinas recibidas. A ejemplo de la matemática, fundará la nueva ciencia sobre una base deductiva. Sueña con una *mathesis universalis* que nos haría señores y maestros de la naturaleza. La verificación experimental pasa a segundo plano. Llega a reprocharle a Galileo que pretenda construir sin fundamentos, estudiar experimentalmente la caída de los cuerpos sin preocuparse de la naturaleza de la gravedad.

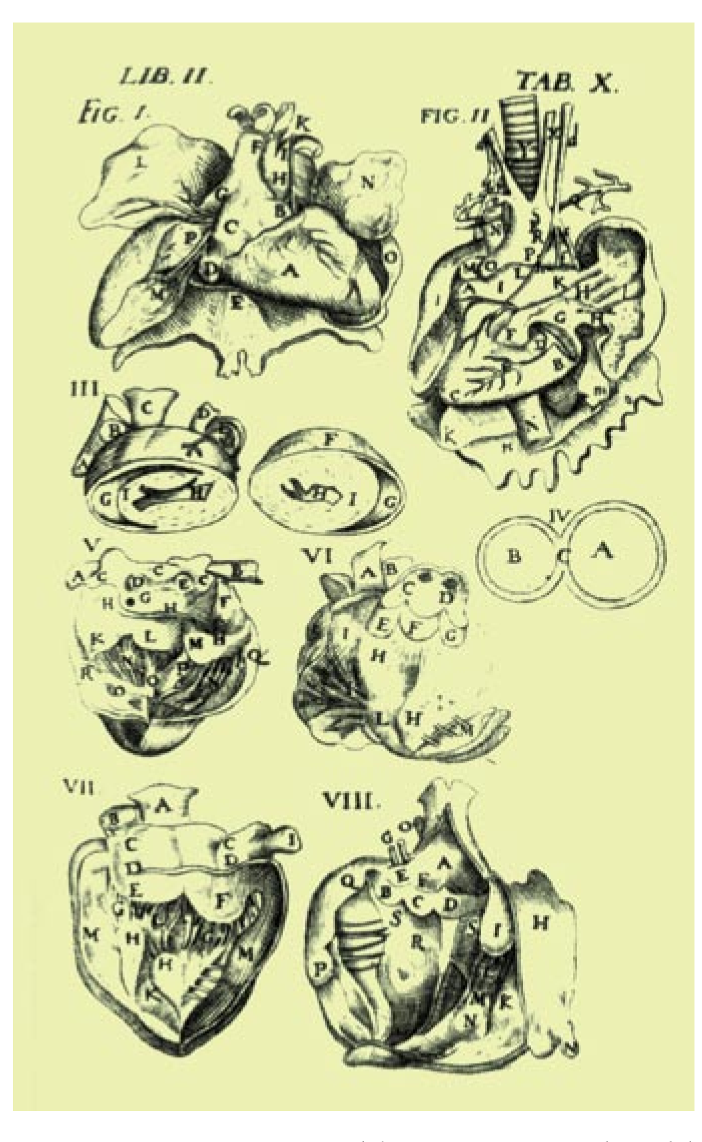
Descartes identifica substancia (o materia) con extensión. El espacio cartesiano, infinito, está pleno de materia, sin vacío. La materia única y sutil se manifiesta más o menos aglomerada, pero siempre animada por un movimiento en torbellino. El universo que imagina Descartes no conoce la quietud. En el origen, Dios pone la materia en movimiento; los torbellinos harán el resto. En el centro de los torbellinos se forman las estrellas que, al enfriarse, se transforman en planetas o en cometas.

Compendia su física en *Le Monde*. Descartes llama mundo a la totalidad de las cosas creadas. En esa obra enuncia los cuatro principios de la explicación mecanicista de la naturaleza: movimiento, grosor, figura y disposición de las partes. Los elementos de la física cartesiana, despojados de toda cualidad, sometidos a choques, se reparten en tres tipos de materia: sutil, mediocre y gruesa. A esta triple partición corresponden tres tipos de cuerpos en el universo: luminosos, transparentes y opacos. Descartes, rechazando el vacío, reconoce tres dominios, a saber, terrestre, celeste y el dominio de las estrellas. Se alinea con las tesis copernicanas, hasta el punto de que en carta al padre Mersenne le confiesa que ha construido su física sobre el movimiento de la Tierra.

En 1633 decide guardar las cuartillas de *Le Monde* en el armario, en espera de tiempos más propicios. Por extraño que parezca, ese texto no se había publicado hasta ahora con rigurosa fidelidad al original, ni en el orden en que lo deseaba su autor. El tratado de *L´homme* constituía el capítulo XVIII del manuscrito inacabado y con él se proponía uncir la revolución de Vesalio a la de Copérnico y fundamentar una nueva relación del hombre con el mundo. De ahí que la edición de Annie Bitbol-Hespériès y Jean-Pierre Verdet constituya un acontecimiento doblemente excepcional, pues suministra el texto completo y

un conjunto de documentos iconográficos inéditos, decisivos para su comprensión. Respecto a lo último, Descartes invitaba a acudir a algún anatómico fiable. Lo decía por propia experiencia con los grabados del *Theatrum anatomicum* de Caspar Bauhin, que aclaran, y mucho, el texto cartesiano.

Plantea el nudo de la cuestión del hombre en el contexto de la tradición médica, que él conoce, pero a la que se opone. "Deseo, dice, que consideréis que las funciones corporales se siguen todas naturalmente, en esta máquina, de la sola disposición de los órganos, ni más ni menos que lo hace un reloj u otro autómata, con sus contrapesos y ruedecillas; de suerte que no se precisa pensar en ninguna alma vegetativa o sensitiva, ni en ningún otro principio de movimiento y vida, sino en su sangre y sus espíritus, agitados por el calor del fuego que quema continuamente en su corazón y que es de la misma naturaleza que todos los fuegos que encontramos en los cuerpos inanimados."



Diversas representaciones del corazón, extraídas del Theatrum anatomicum *de Caspar Bauhin, en el que se formó Descartes*

Puesto que el cuerpo funciona sin el recurso a un "alma principio de vida" y puesto que no hay más alma que el pensamiento, Descartes introduce una ruptura en el campo del saber. Pero ese dualismo de alma y cuerpo no debe hacernos olvidar que desde la redacción de *L'homme* existe un tercer elemento fundamental para Descartes: la unión del alma y el cuerpo, la única que permite definir verdaderamente al hombre.

El mecanicismo tuvo otra vertiente, en muchas aspectos más incisiva que la filosofía cartesiana a la que se enfrentaba en puntos principales. Nos referimos a la doctrina de Pierre Gassendi (1592-1655), expuesta en perspectiva histórica por el autor de *Atomism and its Critics*. Gassendi remozó las ideas atomistas al darles un nuevo contenido acorde con la física de su tiempo, de la que por otro lado fue uno de sus promotores junto con Mersenne, Peiresc y Galileo. Su observación del tránsito de Mercurio en 1631 confirmó las leyes de Kepler e indirectamente el heliocentrismo copernicano.

En cuanto filosofía de la naturaleza, el atomismo pivota en torno a cuatro postulados centrales, dos de los cuales podrían considerarse existenciales (hay partículas indivisibles y vacío) y otros dos de carácter justificativo (reduccionismo y mecanicismo). Para este sistema, los últimos componentes de la naturaleza son partículas físicamente indivisibles (átomos), que pueden moverse con plena libertad merced a su coexistencia con el vacío. Doctrina reduccionista, explica el llegar a ser, el cesar de ser y la alteración cualitativa de los cuerpos sensibles en términos de movimiento local de los átomos. Afirma, y en ello se refleja su adscripción a la corriente mecanicista, que ningún cuerpo se mueve si no es por impulso de otro que se halla ya en movimiento.

Al negar la divisibilidad infinita, construía todas las magnitudes a partir de *minima* discretos. Para Gassendi, de la idea de extensión matemática como infinitamente divisible no se seguía por necesidad que la realidad material se partiera también sin fin. Por clara y distinta que fuera la idea matemática no exigía su realización en la naturaleza. La extensión matemática existe sólo en el reino de las ideas, en la mente del geómetra. Más aún, una divisibilidad física infinita violaría el principio según el cual de la nada no puede salir nada, ni nada puede convertirse en algo.

La divisibilidad física presupone un vacío interior: la divisibilidad física infinita implicaría la disolución completa de un cuerpo en el vacío o la nada. El átomo de Gassendi se extiende en tres dimensiones, es absolutamente sólido y físicamente indivisible por cualquier fuerza natural, aunque divisible en el pensamiento y por la potencia divina.

Espacio y tiempo, infinitos, eternos e incorpóreos, son, para Gassendi, increados e independientes de la Divinidad. Espacio y tiempo aportan el marco necesariamente existente para la creación del cosmos. De ese espacio infinito o vacío, Dios tomó una porción para instalar nuestro mundo corpóreo. Dentro de nuestro mundo debe haber, además, vacíos intersticiales que posibiliten el movimiento. Gassendi reafirma contra Descartes el argumento atomista clásico del movimiento local en la existencia del espacio vacío. En un *plenum* absoluto, el movimiento no puede ni empezar ni terminar.

En la física de Gassendi, el movimiento se explica por un *pondus*, un peso instilado en cada átomo. La materia no es, pues, inerte, sino activa. Gassendi mostró un notable interés por el trabajo experimental

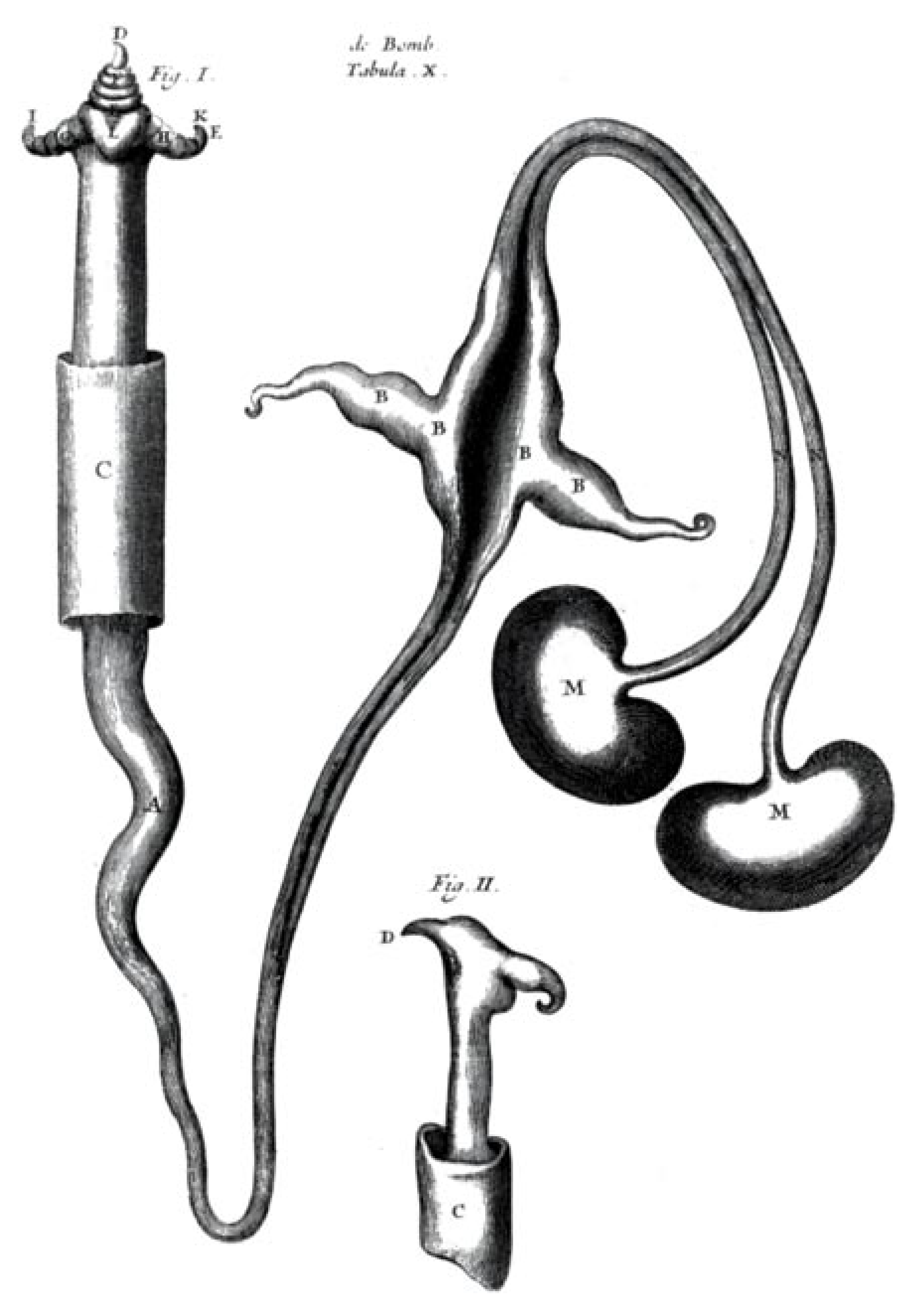


Ilustración del aparato reproductor masculino del gusano de seda que aparece en el libro de Malpighi De bombyce *(Londres, 1669)*

de Torricelli y Pascal y los aplaudió porque parecían confirmar la cosmovisión atomista, la existencia en la naturaleza del espacio vacío. Su discípulo Charleton vinculó el atomismo con la pneumática naciente.

Gassendi tuvo notables seguidores, Robert Boyle el más eximio. Pero no se libró de críticas durísimas; la más penetrante, del joven Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), cuestión abordada por Philip Beeley en *Kontinuität und Mechanismus*. "Yo también me dediqué a la noción de vacío y átomos, escribe un Leibniz adolescente, pero la razón me llevó por el camino adecuado."

En opinión de Leibniz la teoría atomista ofrece una descripción del mundo que satisface la imaginación, pero no resiste un detenido análisis racional. Por encima de todo le recrimina el recurso a unos inexistentes corpúsculos elementales. Para Leibniz el último corpúsculo se subdivide realmente *in infinitum*. Lo que distingue del espacio a la materia es la *antypia*, la impenetrabilidad. Espacio y tiempo, prosigue Leibniz, no son más que relaciones, posibles disposiciones, tipos de orden: podrían no tener existencia fuera de los objetos y acontecimientos que ordenan.

Niega Leibniz que existan indivisibles extensos. En ese contexto, el concepto de *conatus* o velocidad instantánea (*ds*/*dt*) no depende de los *minima* indivisibles de espacio y tiempo. Todo lo que nosotros necesitamos es tomar cantidades decrecientes (siempre divisibles, empero) Δs y Δt hasta que el valor $\Delta s/\Delta t$ se acerque a un valor límite. Toda magnitud continua consta de una infinidad de partes distintas. No hay átomos. Y llega a la conclusión de que los cuerpos no son más que *phenomena bene fundata*, apariencias de agregados de substancias individuales (mónadas) que los constituyen. Cada mónada representaba el universo entero.

No abundan las investigaciones sobre la incidencia del mecanicismo en la praxis médica. Pero se dio esa dependencia y fue Marcello Malpighi (1628-1694) una de sus figuras determinantes. Cuando parecía dicho casi todo sobre su función en la historia de la biología, no sólo de la medicina, he aquí que la aparición reciente de *Aspetti poco notti della Storia dell'Anatomia Patologica tra '600 e '700* y *Marcello Malpighi Anatomist and Physician* nos descubre contornos nuevos. De entrada, colegimos un Malpighi heredero del legado mecanicista de Descartes, Gassendi y Leibniz; por supuesto, no a la vez ni en el mismo momento. Sensible en un comienzo a los postulados de Descartes, consideró, sin embargo, hiperespeculativo *L'homme*. Imaginó una máquina glandular más próxima al "autómata natural" de Leibniz que a la "estatua" de Descartes. En el crepúsculo de su vida intelectual se abrió a los principios atomistas.

Malpighi aprendió de William Harvey que la función de un órgano debe extraerse de su estructura, que la anatomía avanza con la disección. Harvey había revolucionado el saber médico en 1628 con su *Exercitatio Anatomica de Motu Cordis et Sanguinis in Animalibus*. También el talante. Cuando se le recrimina su distanciamiento de Galeno, responde que no hay opinión que pueda modificar la evidencia de los sentidos, ni antigüedad capaz de alterar la obra de la naturaleza. Y así, apunte tras apunte, autopsia tras autopsia, Harvey va renovando la patología. Descubre en los hidrópicos, por citar un botón de muestra, un hígado endurecido y retraído (cirrótico quizá), riñones

duros, lívidos y exangües (por nefritis crónica), bazo violáceo.

Pero no sólo de Harvey vivió Malpighi. Llamado a la cátedra de anatomía de Pisa, se encuentra allí en 1656 con Giovanni Alfonso Borelli, napolitano de ascendencia española venido a enseñar matemática. En Pisa, Borelli, sistematizador de la iatromecánica, le llevó al estudio de la filosofía libre, según cuenta el propio Malpighi, quien abrazó entonces la metodología galileana. En el laboratorio de Borelli se adiestró en la "anatomia artificiosa et subtilis". Trasladado a Bolonia, Malpighi empezó a trabajar con el microscopio. Al combinar la disección, ejercitada en Pisa, con la observación, ponía la primera piedra de la anatomía microscópica.

Mecanicista a la postre, prescindía de la perspectiva finalista en su explicación de órganos y procesos. Hablara de los pulmones o de los riñones, buscaba siempre estructuras consonantes con funciones mecánicas. Si observaba que los riñones se componían de vasos y fibras, veía natural inferir que producían orina de una forma mecánica, a la manera de un colador. Una filosofía mecanicista que coexistía con retazos galénicos. Aunque insistía en que la microanatomía mejoraba la praxis médica, a la hora de recetar se apoyaba en la farmacopea tradicional por falta de remedios alternativos; en consecuencia, pese a describir su terapia en términos químicos, apenas se alejaba de la terapia humoral y su doctrina de los opuestos. En el propio manejo del microscopio muchas veces veía lo que deseaba o al menos esperaba ver.

Holista *avant la lettre*, Malpighi fue firme defensor del carácter unitario de la vida y, por tanto, de las afinidades y convergencias del mundo vegetal y animal. Programa que intentó llevar a demostración en sus trabajos sobre la anatomía microscópica del gusano de seda, patología vegetal y embriología animal y que, a través del espaldarazo que esas investigaciones reciben de la Regia Sociedad de Londres, sirven de faro para los estudios naturalistas del último tercio del XVII. Los numerosos grabados que adornan sus obras ponen de manifiesto la importancia que él concedía a la representación plástica de los descubrimientos y señalan que sus escritos se proponían no sólo ser leídos, sino también vistos.

LUIS ALONSO

Tendencias sociales

Uniformización

¿CONVERGENCIA O DIVERGENCIA? COMPARACIÓN DE TENDENCIAS SOCIALES RECIENTES EN LAS SOCIEDADES INDUSTRIALES. Dirigido por Simon Langlois y Salustiano del Campo. Fundación BBV; Bilbao, 1995.

Se trata de un grupo de estudios realizados por equipos de trabajo nacionales interesados en la detección de tendencias relacionadas con el cambio social en las sociedades industriales avanzadas. Son importantes en estos trabajos los conceptos de modernización y de consumos de masas, y los resultados son una información útil.

Los grupos de trabajo aparecen aglutinados en el contexto del proyecto "Cartografía Comparada del Cambio Social". Los datos de diagnóstico se han obtenido en Alemania Occidental, Quebec, EE.UU. y Francia. Asimismo, aparecen otros relacionados con un estudio sobre fecundidad demográfica en España. A este proyecto se han incorporado, además de España, Rusia e Italia, y en lo fundamental se propone estudiar el peso concreto que tienen los factores objetivos y subjetivos en dichos procesos de modernización.

Para que los datos sean estadísticamente comparables, se ha optado por incluir un total de 78 variables o tendencias consideradas como indicadores, y comprendiendo un período de tiempo entre 1960-1990. Las mismas tendencias de cambio social existen en cada uno de los países mencionados, y la única diferencia consiste en el hecho de que las variables se dan con mayor o menor intensidad según los grados alcanzados en términos de modernización. Se destacan como intereses específicos del estudio datos sobre familia, relaciones de parentesco, divorcio, educación, empleo, salarios, ocio, precios de consumo, participación política, delincuencia y otros fenómenos relacionados con el discurso de la vida social en dichos países y con los movimientos de la estructura social.

En general, las tendencias por las que se han interesado mayormente los investigadores que componen los equipos nacionales son las que pueden ser objeto de análisis estadístico. Aunque no se menciona explícitamente el valor de los análisis cualitativos, se desprende de las técnicas estadísticas prevalecientes en los enfoques aplicados a los datos, que se trata de estudios básicamente centrados en valores estadísticos. Por lo mismo, las conclusiones parten de un diseño teórico derivado de reconocer en las relaciones cuantitativas los máximos de objetividad. Las conclusiones de los directores del estudio son, sin embargo, cualitativas.



Bolsa de valores de Chicago

Los equipos de trabajo han llegado a ciertas conclusiones, todas detectadas antes cualitativamente por observadores de campo, como son el hecho del incremento de la participación de la mujer en el mercado del empleo, la disminución de la conflictividad social, el descenso de la fecundidad y la disminución funcional de la autoridad personal en las relaciones sociales, así como el aumento de las contaminaciones ambientales.

Las referencias más significativas que se dan en la modernización son de tres tipos: definidas por determinaciones sociales desde la tecnología; las que resultan del progreso técnico sin ser éste su causa directa, y las que ocurren en las sociedades sin que tengan relación aparente con procesos inicialmente tecnológicos.

El valor principal de este estudio consiste en descubrirnos el hecho de que siendo semejantes las tendencias en los 4 países que fueron objeto de investigación, se hace posible la comparación de los fenómenos en términos de su incidencia relativa en cada uno de ellos. Se advierten, pues, paralelismos en las tendencias y en los fenómenos. Y se destaca que los países que en el pasado aventajaban a otros en cuanto a velocidad de modernización, ahora esta velocidad ha pasado a otros.

CLAUDIO ESTEVA-FABREGAT

IDEAS APLICADAS

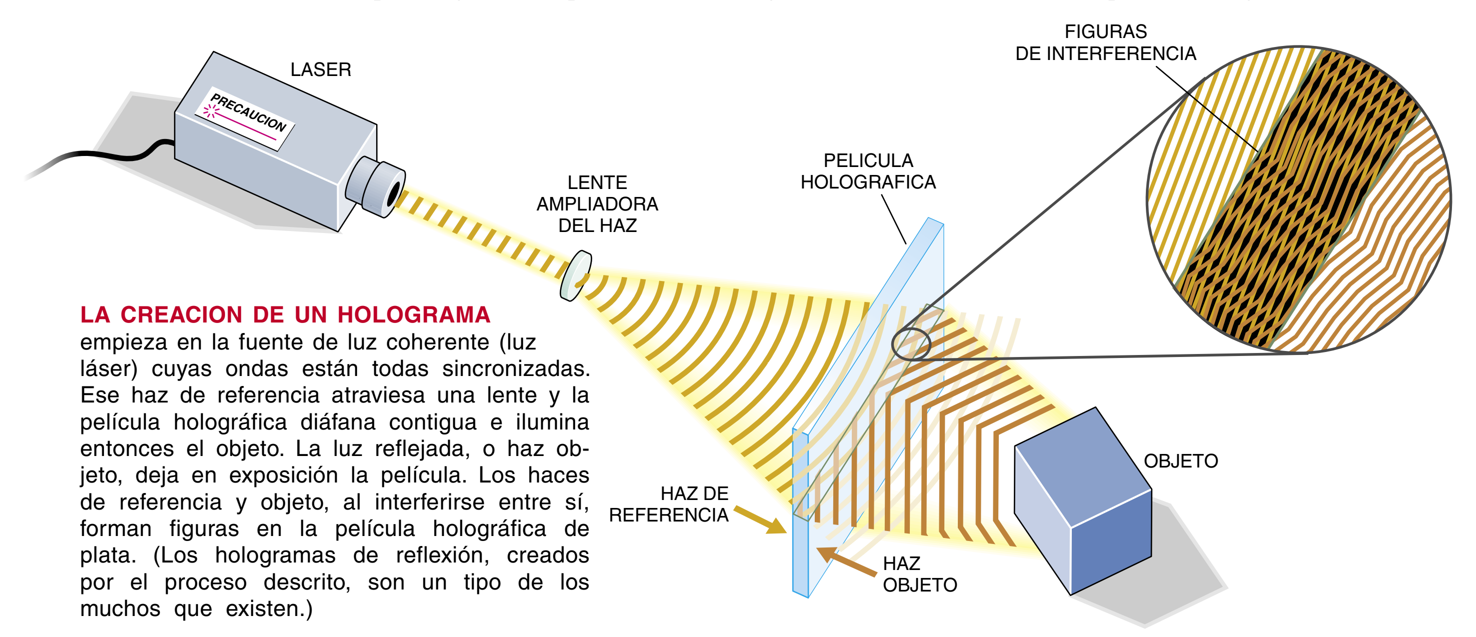
Stephen A. Benton

Hologramas

Llamamos holograma al registro de una imagen óptica tridimensional realizado sobre película de grano muy fino mediante haces de luz láser. A diferencia de la fotografía, que registra sólo la intensidad de cada onda luminosa reflejada en un objeto (produciendo zonas claras y oscuras sobre una película), la holografía registra intensidad y dirección, o fase, de la luz. La información acerca de la intensidad y la dirección se codifica por el grado en que las crestas y los senos de las ondas reflejadas están en sincronía con los de una onda de referencia. Las ondas en fase producen figuras de interferencia luminosas; las ondas desfasadas, figuras pálidas.

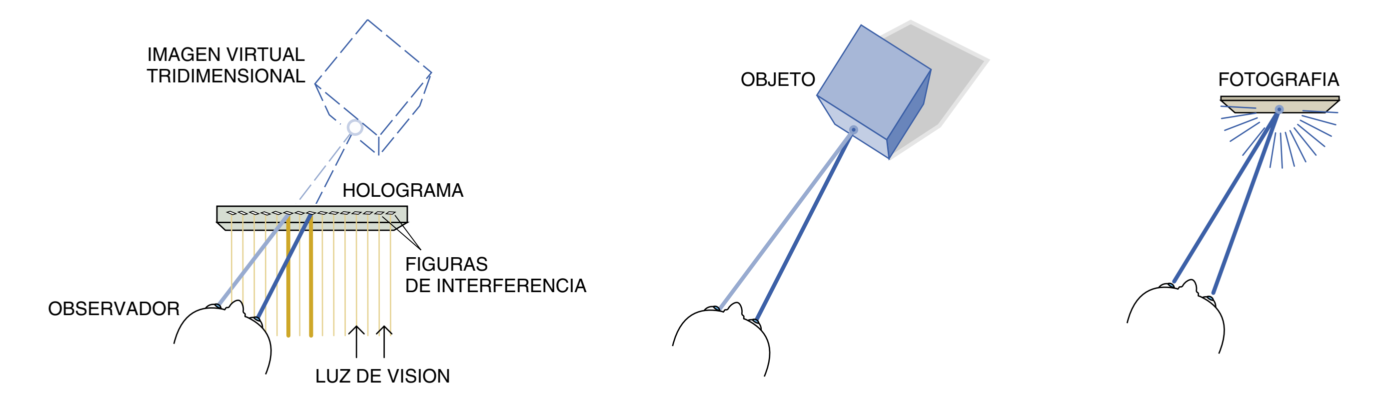
Cuando sobre una película holográfica revelada incide luz blanca, las figuras de interferencia actúan cual minúsculos espejos orientados bajo una miríada de ángulos. Esos espejos devuelven la luz desde la superficie del holograma; lo hacen en las mismas direcciones en que se reflejó desde la imagen del objeto. Cada ojo ve una imagen diferente porque la intensidad de las ondas reflejadas varía con su dirección, de ahí que el observador perciba profundidad.

Un solo holograma equivale, pues, a múltiples fotografías, tomada cada una desde una perspectiva distinta y enfocada a una profundidad diferente. No es ilícito afirmar que un holograma vale más que mil imágenes.



LA CREACION DE UN HOLOGRAMA empieza en la fuente de luz coherente (luz láser) cuyas ondas están todas sincronizadas. Ese haz de referencia atraviesa una lente y la película holográfica diáfana contigua e ilumina entonces el objeto. La luz reflejada, o haz objeto, deja en exposición la película. Los haces de referencia y objeto, al interferirse entre sí, forman figuras en la película holográfica de plata. (Los hologramas de reflexión, creados por el proceso descrito, son un tipo de los muchos que existen.)

PARA VER UN HOLOGRAMA hay que apuntar luz sobre la película bajo el mismo ángulo que el haz de referencia original. Las figuras de interferencia de la película de plata se difractan y reflejan la luz; así recrean la orientación y la intensidad de las ondas del haz objeto original. Para un punto dado, cada ojo enfoca la luz procedente de una figura de interferencia distinta (*izquierda*). Ocurriendo eso para cada punto de la imagen, el observador percibe una imagen virtual tridimensional flotando por detrás del holograma. Variando la intensidad de la luz con el ángulo bajo el que se contempla el objeto, el holograma reproduce la visión del observador en el mundo real. La comparación se muestra mediante los distintos sombreados para ambos rayos izquierdo y derecho en la imagen tridimensional (*izquierda*) y el objeto visto en el mundo real (*derecha*). Por su parte, una fotografía bidimensional refleja la misma intensidad de luz en todas las direcciones (*derecha*).



Seguiremos explorando los campos del conocimiento



EL ORIGEN DE LAS AVES Y SU VUELO, por Kevin Padian y Luis M. Chiappe

La anatomía y aerodinámica de aves fósiles y actuales nos revelan que estos vertebrados que colonizaron el aire evolucionaron a partir de dinosaurios carnívoros que vivían en el suelo.

LA NAVE LONGA VIKINGA, por John R. Hale

Las flotas de naves longas, de manga reducida y abarrotadas de guerreros, hicieron posible que los vikingos ejercieran el dominio naval de Europa durante tres siglos, desde el 800 al 1100 de nuestra era.

CIENCIA EN LA GUERRA FRIA, por Jeffrey T. Richelson

En una colaboración sin precedentes, científicos y miembros del servicio de inteligencia norteamericano trabajan juntos para averiguar qué pueden revelarnos del planeta los inmensos archivos secretos.

LA TEORIA QUE ANTES SE LLAMABA DE CUERDAS, por Michael J. Duff

Va creándose una teoría del todo en la que no sólo intervienen cuerdas, sino también membranas y agujeros negros.

TESTIGOS DE HIELO DE GROENLANDIA, por Richard B. Alley y Michael L. Bender

Congelado in situ desde hace decenas de miles de años, el hielo de Groenlandia abre una puerta para observar el pasado —y el futuro— del clima.

LA EXPOSICION DIARIA A CONTAMINANTES TOXICOS, por Wayne R. Ott y John W. Roberts

La normativa ambiental ha mejorado la calidad del aire de la calle. Pero en los interiores persisten problemas a los que se ha prestado demasiado poca atención.

EN BUSCA DE SUCEDANEOS DE LA SANGRE, por Mary L. Nucci y Abraham Abuchowski

La amenaza de una escasez de sangre y los temores de posibles contaminaciones han dado un nuevo impulso a los esfuerzos por hallar otras opciones. Algunos de los compuestos estudiados son bastante prometedores.

POLARONES MAGNETICOS, por J. M. De Teresa Nogueras y M. R. Ibarra García

En ciertos óxidos de manganeso la resistencia eléctrica puede cambiarse varios órdenes de magnitud al aplicar un campo magnético. La formación de polarones magnéticos es la responsable.

